

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav strojírenské technologie

KOMPOZITNÍ CHROMOVÉ POVLAKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Autor: Bc. Václav Solar

Studijní obor: Výrobní a materiálové inženýrství

Vedoucí práce: doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.

Konzultant: Ing. Dana Benešová

Místo, rok: Praha, 2015

Oficiální zadání...

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci *Kompozitní chromové povlaky* vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne

.....

podpis

Poděkování:

Rad bych poděkoval Ing. Daně Benešové a doc. Ing. Viktorovi Kreibichovi, CSc. za doporučení a cenné rady při psaní této diplomové práce.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá problematikou kompozitních galvanických povlaků na bázi chromu pro aplikace na pístní kroužky. V první části se práce zabývá problematikou pístních kroužků a typy opotřebení. Dále je rozebrána problematika povrchových úprav používaných na pístní kroužky. Další část je věnována kompozitním povlakům na bázi chromu a řešení problémů s mícháním elektrolytů. V experimentální části je navrženo zařízení pro míchání kompozitní galvanické lázně. Toto zařízení by mělo eliminovat problémy způsobené částicemi v elektrolytu. Toto zařízení pracuje na principu ejektorového míchání a je zde porovnáváno s mícháním vzduchem, které se doposud používá. Je sledováno usazování částic během chromování a vliv intenzity míchání na množství vyloučeného korundu v chromovém povlaku a na celkovou vyloučenou tloušťku povlaku. Problém je řešen ve spolupráci s firmou Buzuluk, a.s., která je předním českým výrobcem pístních kroužků.

Klíčová slova: Kompozitní povlak, Pístní kroužek, Míchání lázně, Ejektor, Galvanika.

Annotation

This thesis deals with the issue of composite galvanic chromium based coatings for piston rings. First part of the thesis considers issue of piston rings and types of wear. Further analyzes problems of finishes used on the piston rings. Another section is devoted composite coatings based on chromium and problems with agitation of the electrolyte. In the experimental part it is suggested a device for agitation the composite electroplating bath. The device should eliminate the problems caused by particles in the electrolyte. This device works on the principle of the eductor mixing and there was compared with mixing air that still used. Deposition of particles is monitored during plating and the effect of the agitation intensity on the amount of excreted Al_2O_3 in chromium coatings and the general exclusion of the coating thickness. This issue has been solved in cooperation with Buzuluk,a.s.,the leading Czech manufacturer of piston rings.

Keywords: Composite coating, Piston rings, Bath agitation, Eductor, Galvanization.

Obsah

1. Úvod	9
2. Pístní kroužky	10
2.1. Základní parametry pístních kroužků	10
2.1.1. Střední měrný tlak	11
2.1.2. Skutečný měrný tlak	11
2.1.3. Tangenciální a radiální síla	12
2.2. Typy pístních kroužků	13
2.2.1. Těsnící pístní kroužky	13
2.2.2. Stírací pístní kroužky	15
2.3. Provedení zámku	17
2.4. Spotřeba oleje	17
2.5. Materiály pístních kroužků	17
2.5.1. Litina s lupínkovým grafitem	18
2.5.2. Litina s kuličkovým grafitem	18
2.5.3. Ocel	18
3. Opotřebení	19
3.2. Abrazivní opotřebení	20
3.3. Erozivní opotřebení	21
3.4. Kavitační opotřebení	22
3.5. Únavové opotřebení	22
3.6. Vibrační opotřebení	23
3.7. Příklady opotřebení – pístní kroužky a vložky válců	24
4. Povrchové úpravy pístních kroužků	24
4.1. Chemické povrchové úpravy	24
4.1.1. Fosfátování	24

4.2.	Chemicko-tepelné nanášení povlaků	25
4.2.1.	Nitridace	25
4.2.2.	Plazmová nitridace	25
4.2.3.	Sulfonitridace	25
4.2.4.	Ferroxování	26
4.3.	Termické nástřiky	26
4.3.1.	Termický nástřik plamenem.....	27
4.3.2.	Termický nástřik elektrickým obloukem	27
4.3.3.	Termický nástřik plazmou.....	28
4.3.4.	Termický detonační nástřik:.....	28
4.3.5.	HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) nástřik.....	29
4.3.6.	Termické nástřiky pro pístní kroužky	29
4.4.	PVD vakuové naprašování.....	30
5.	Chromování	30
5.1.	Dekorativní chromování	30
5.2.	Tvrdé (funkční) chromování	30
5.2.1.	Složení a vlastnosti vrstvy.....	31
5.2.2.	Vlastnosti vrstvy.....	31
5.2.3.	Tloušťka povlaku	32
5.3.	Princip galvanického tvrdého chromování	32
5.4.	Chromovací lázně	33
5.5.	Vady při tvrdém chromování	34
5.6.	Kompozitní Cr povlaky	35
5.7.	Tvrdé chromování pístních kroužků	35
5.8.	Kompozitní chromové povlaky pro pístní kroužky	37
5.8.1.	Princip vylučování	37
5.8.2.	Plniva.....	38

5.8.3.	Nanodiamantové částice.....	39
5.8.4.	Částice korundu Al_2O_3	41
5.8.5.	Budoucnost kompozitních Cr povlaků.....	42
6.	Míchání elektrolytů	42
6.1.	Běžné metody míchání.....	42
6.2.	Míchání pomocí vzduchu.....	43
6.3.	Míchání pohybem elektrody	43
6.4.	Míchání pomocí ejektoru	44
6.5.	Mechanické míchání	45
7.	Experimentální část	47
7.1.	Výběr ejektoru	48
7.2.	Výběr čerpadla	49
7.3.	Výsledky experimentu	53
8.	Návrh zařízení pro míchání ve vývojové vaně	54
9.	Měřicí zařízení.....	57
9.1.	Měření obsahu vyloučených částic	57
9.2.	Měření tloušťky povlaku.....	58
9.3.	Zkušební vzorky	59
10.	Naměřené hodnoty	61
10.1.	Obsah částic v povlaku.....	61
10.2.	Tloušťka povlaku	63
11.	Ekonomické zhodnocení.....	68
12.	Závěr	71
13.	Použitá literatura	73
14.	Přílohy.....	76

1. Úvod

V poslední době se stále výrazně rozvíjí automobilový průmysl, to vede k rozvoji i v ostatních odvětvích, které s automobilovým průmyslem souvisí. Speciálně na pístní kroužky jsou kladeny stále vyšší nároky. Pístní kroužky často určují celkovou životnost pístní skupiny, proto je snaha o zlepšení jejich vlastností. Tyto stále se zvyšující nároky, jako je zvyšující se pracovní teplota a zvýšené mechanické namáhání vede k používání a dalšímu vývoji nových povrchových úprav pro pístní kroužky. Byly vyvinuty kompozitní povlaky na bázi chromu, které mají chromovou matici a nejčastěji disperzní částice korundu (Al_2O_3) a diamantu. Při aplikaci těchto povlaků se ve výrobě setkáváme s řadou problémů. Velkým problémem při procesu kompozitního chromování je míchání elektrolytu s částicemi korundu. Proto, aby se částice korundu (Al_2O_3) vyloučili v chromovém povlaku je zapotřebí chromovací lázeň obsahující tyto částice dostatečně míchat, aby se částice udržely ve vznosu a mohly se vyloučit v chromovém povlaku.

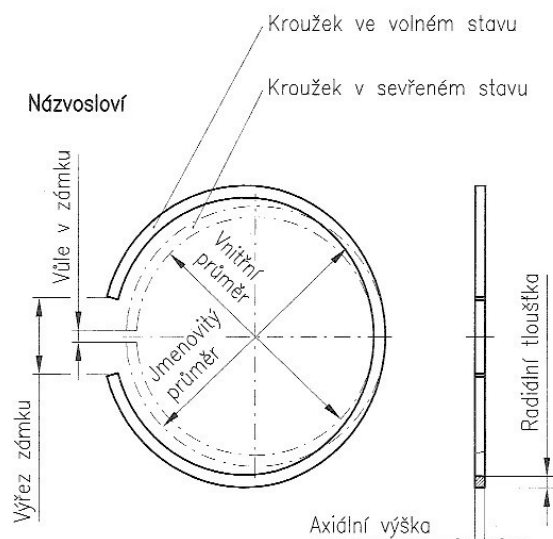
Předmětem této diplomové práce je problematika kompozitních galvanických povlaků a ve spolupráci s firmou Buzuluk, a.s. byly řešeny problémy s mícháním elektrolytu obsahující částice korundu a byl navrhnout systém míchání, který eliminuje problémy s dosavadní technologií míchání. Stávající systém míchání je založen na míchání pomocí stlačeného vzduchu. Tento systém je ekonomicky náročný z hlediska ceny stlačeného vzduchu. Další nevýhodou je ucpávání otvorů v systému trubek na dně nádrže a možnost vniknutí nežádoucích látek do elektrolytu jako je olej ze zdroje stlačeného vzduchu nebo cizí částice ze vzduchu. Nevýhodou je také omezená schopnost opětovného rozmíchání částic ze dna nádrže po usazení při vypnutí míchání při delších odstávkách procesu. Pokud dojde při odstávce vany k ucpání otvorů přivádějících vzduch pro míchání, není tento systém míchání schopen opětovného vznosu částic v lázni a je nutno vanu vypustit a vyčistit. Proto se chromovací lázeň míchá i mimo provoz. To je ekonomicky velmi náročné a zvyšují se tím výrobní náklady. Cílem této práce je tyto problémy eliminovat a navrhnout zařízení pro míchání těchto lázní, které bude schopno splnit požadavky na vyloučený povlak a požadavky na funkčnost a opětovné rozmíchání lázně i po delší odstávce.

2. Pístní kroužky

Pístní kroužky spalovacích motorů často určují celkovou životnost pístové skupiny. Jejich hlavní funkcí je utěsnění spalovací komory od klikové skříně. Dále zajišťují tok tepla z tělesa pístu do válce. Zabraňují vniknutí oleje z klikové skříně do spalovací komory a vytvářejí jednotný olejový film na povrchu válce. S ohledem na to, že pístní kroužky pracují za velmi obtížných podmínek, se od nich požadují různé vlastnosti. [1] [2]

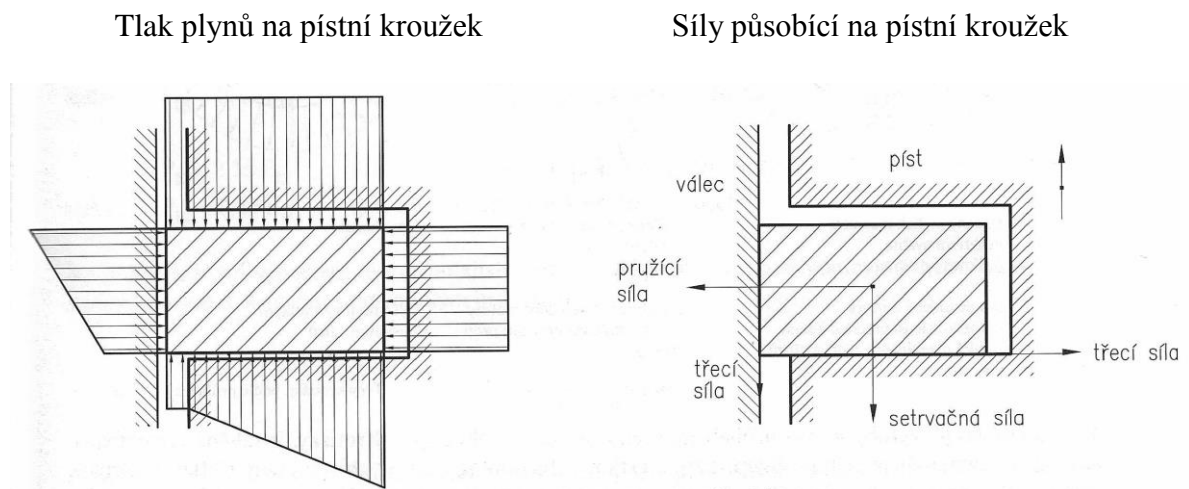
- Rychlé přizpůsobení stěně válce.
- Co nejlepší utěsnění kompresního prostoru proti prostoru klikové skříně.
- Odvedení části tepla z tělesa pístu.
- Schopnost regulovat spotřebu oleje.
- Malé ztráty způsobené třením.
- Co nejmenší opotřebení.
- Nízká hmotnost.
- Nízká cena.

2.1. Základní parametry pístních kroužků



Obr. 1 Názvosloví základních parametrů pístních kroužků. [1]

Síly a tlak působící na pístní kroužek za předpokladu, že pístní kroužek přiléhá po celém obvodu na stěnu válce a zároveň přiléhá spodní částí plochy na odpovídající plochu drážky pístu, znázorňuje obrázek níže. Z rozložení tlaku plynů působících na pístní kroužek je patrné, že pružící síla kroužku se znásobuje tlakem plynů, které proniknou do vnitřního prostoru dna drážky. [1]



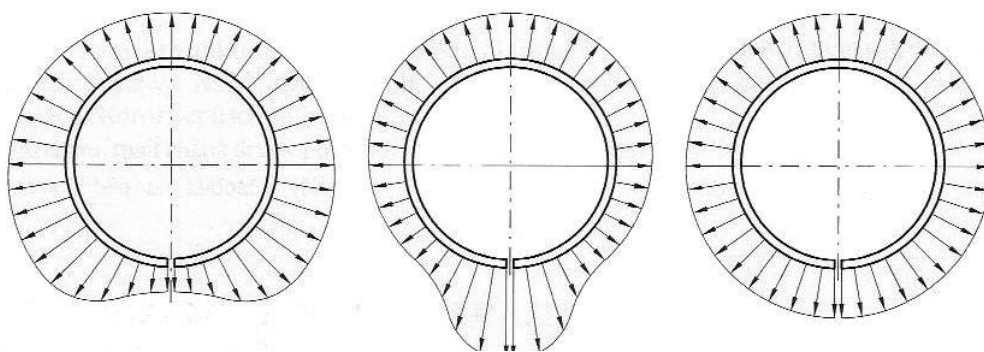
Obr. 2 Síly a tlak plynů působících na pístní kroužek. [1]

2.1.1. Střední měrný tlak

Střední měrný tlak je průměrná hodnota tlaku pracovní plochy pístního kroužku na stěnu válce. Střední tlak je jen zlomkem tlaku, který vyvozují spaliny při pracovním zdvihu pístu. I přesto je však velmi důležitou hodnotou pro správnou funkci kroužků. Pro těsnící kroužky se podle norem pohybuje v rozmezí $0,12$ až $0,25 \text{ N.mm}^{-2}$. [1] [2]

2.1.2. Skutečný měrný tlak

Skutečný měrný tlak má po obvodu pístního kroužku různý průběh. Lze vyrobít pístní kroužek třech základních typů průběhu měrného tlaku. [1]



snížený přitlak v zámku,
negativní ovalita,
jablkovitý diagram,

pro dvoudobé motory,
umožňuje lepší přechod,
konec
zámků dvoudobých naft.
motorů přes kanály,

zvýšený přitlak u zámku,
pozitivní ovalita,
hruškovitý diagram,

pro čtyřdobé variálové
motory,
zvysuje stabilitu kroužku
proti chvění,

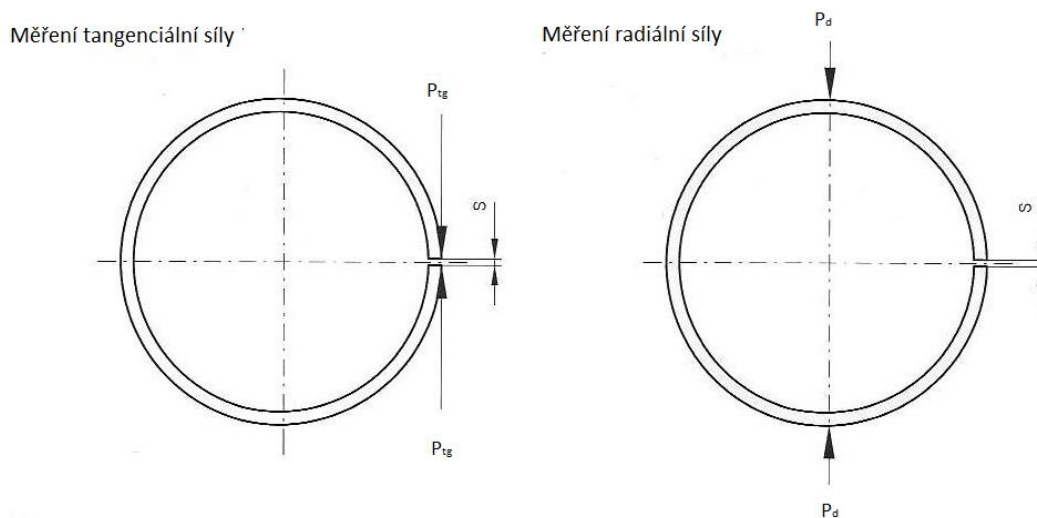
$p = \text{konst}$,

pro motory s velkým
vrtáním válců

Obr. 3 Typy kroužků podle průběhu přitlaku. [1]

2.1.3. Tangenciální a radiální síla

Měrný tlak lze měřit jen velmi komplikovaně a na komplikovaných přístrojích. To vedlo k zavedení pojmu tangenciální síla P_{tg} . Je to síla, kterou získáme na váze, jestliže svíráme kroužek na předepsanou vůli v zámku. Podobně lze na váze také zjistit velikost radiální síly P_d . [1]



Obr. 4 Měření tangenciální a radiální síly. [1]

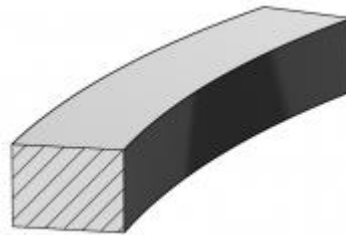
2.2. Typy pístních kroužků

2.2.1. Těsnící pístní kroužky

Hlavní funkcí těsnících pístních kroužků je utěsnění spalovacího prostoru od klikové skříně a přenášet teplo z tělesa pístu do válce. Hrají také důležitou roli pro spotřebu oleje. [2]

Normální těsnící kroužky (válnové), obdlníkový průřez

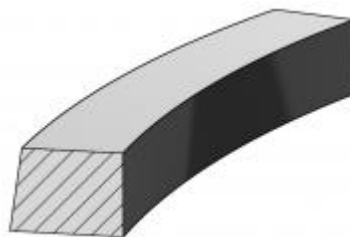
Tyto pístní kroužky najdeme u pístových strojů různých druhů v podstatě ve všech rozměrech. Válková pracovní plocha musí být rovnoběžná se stěnami válce. Připouští se odchylka do $\pm 3'$. Válková plocha se honuje ve válkových pouzdech. Používají se v horní drážce pístu ve vznětových a zážehových motorech osobních automobilů. Kromě použití ve spalovacích motorech se tento typ kroužků běžně používá jako hřidelové ucpávky (těsnění). [1] [2]



Obr. 5 Tvar normálního těsnícího kroužku. [2]

Minutové kroužky

Minutové pístní kroužky se používají, pokud je požadavek, aby spodní hrana bezpodmínečně ležela na stěně válce po celém obvodu. Tento typ kroužků má kuželovou pracovní plochu. Slabý úkos je bez měření jen těžko rozeznatelný, proto je potřeba vrchní stranu kroužku označit značkou, aby se předešlo nesprávnému namontování, což by vedlo k nadměrné spotřebě oleje. Používají se především ve druhé drážce pístu, ale u mohou se použít i v horní drážce. [1] [2]



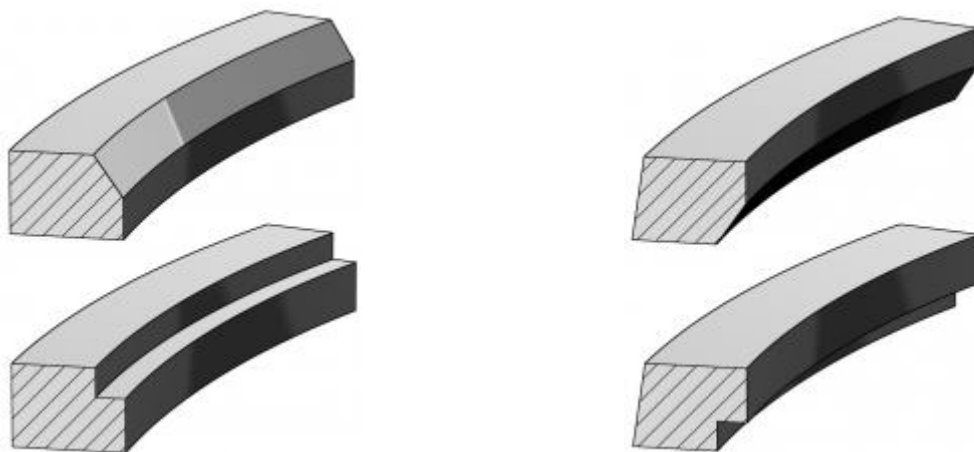
Obr. 6 Tvar minutového kroužku. [1]

Torzně zkroucené pístní kroužky

Torzně zkroucené pístní kroužky mají na vnitřním průměru sraženou hranu na své horní straně. Toto sražení má za důsledek po sevření kroužku na jmenovitý průměr zkroucení obou čelních stran. Tímto sevřením kroužku vzniká kuželovitá pracovní plocha podobná minutovým pístním kroužkům. Funkční výhodou tohoto typu je zkroucení kroužku, ke kterému dochází při zatlačení pístu do válce. To má za následek, že se stěny válce dotýká spodní vnější hrana kroužku. Tento lineární kontakt řídí a zlepšuje stírání oleje. [1] [4]

Negativní torzně zkroucené pístní kroužky

Tento typ kroužku se liší od normálních torzních kroužků tím, že je zkosena spodní vnitřní hrana kroužku. Kromě funkční výhody, že se jeho dolní vnější hrana dotýká lineárně stěny válce, má výhodu v tom, že se dolní strana kroužku zároveň dotýká i dolní vnitřní strany drážky a tím zabraňuje průchodu oleje. [1] [4]



Obr. 7 Tvar torzně zkrouceného pístního kroužku (vlevo) a negativně torzně zkrouceného pístního kroužku (vpravo). [2]

Trapézové těsnící pístní kroužky

Mají kuželové boční strany, tento profil snižuje nebezpečí zapečení a uvíznutí kroužku v drážce pístu, protože se v drážce pístu neusazují pevné zplodiny hoření. V současnosti je považován za standardní tvar pro první drážku pístu v dieselových motorech. [4]



Obr. 8 Trapézový těsnící pístní kroužek. [2]

Tvarování pracovní plochy těsnících kroužků

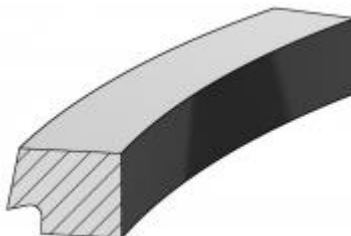
Rozhodující význam na funkci pístního kroužku má tvar pracovní plochy. Díky zavedení vypuklých pracovních ploch vznikají optimální podmínky pro vytváření olejového filmu a tento typ kroužků má menší třecí ztráty než kroužky pravoúhlé. [1]

2.2.2. Stírací pístní kroužky

Stírací kroužek u čtyřdobých motorů má rozhodující roli pro vytváření správného olejového filmu na stěně válce. [1]

Stírací kroužky napier (podsoustružený)

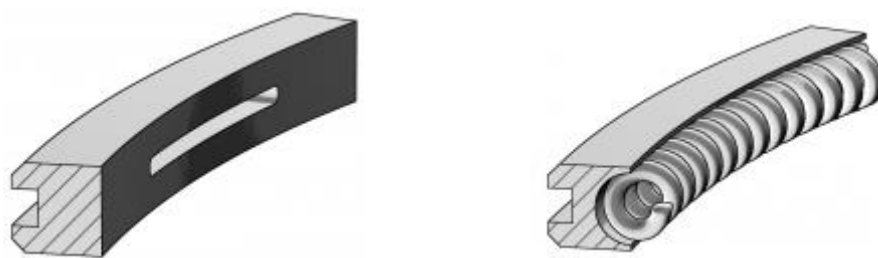
Jedná se o nejjednodušší typ stíracího kroužku. Vyrábí se s kuželovou pracovní plochou. Obvykle se nasazuje do druhé drážky pístu. [1]



Obr. 9 Stírací kroužek s nosíkem „napier“. [2]

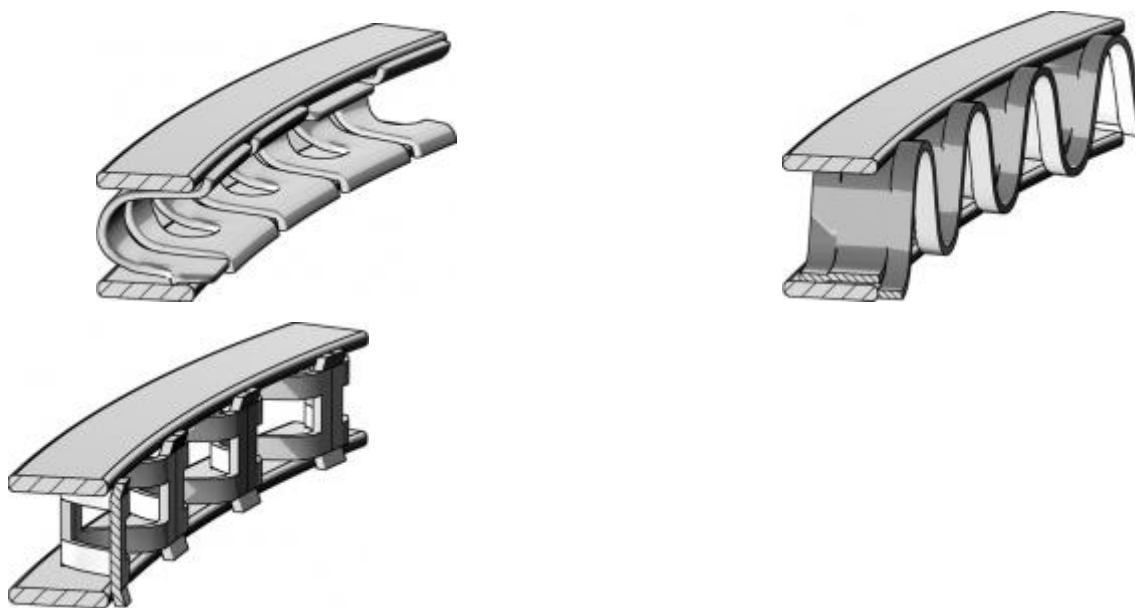
Stírací kroužek s výřezy

Nejjednodušším tvarem stíracího kroužku je kroužek s drážkou bez pružiny. Kvůli nižšímu přitlaku ke stěně válce a menší přizpůsobivosti se tento typ kroužku u moderních motorů již nepoužívá. Vývoj motorů si vyžádal stírací kroužky s větší flexibilitou. Používají se pomocné pružící elementy, které zajišťují pružící schopnost kroužku. Tyto kroužky se vyrábějí s co nejmenším průřezem, aby bylo zajištěno přizpůsobení stíracího kroužku deformování válce. [1] [4]



Obr. 10 Jednodílný (vlevo) a dvoudílný (vpravo) stírací pístní kroužek. [2]

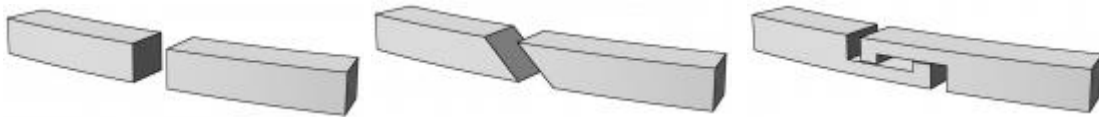
U rychloběžných benzinových motorů se často používají stírací kroužky skládající se z více dílů. Většinou se jedná o dvě ocelové lamely, které jsou spojeny středním tvarovaným dílem, který tyto lamely přitlačuje ke stěně válce a udržuje je ve správné vzdálenosti od sebe. [1]



Obr. 11 Vícedílné lamelové stírací pístní kroužky. [2]

2.3. Provedení zámku

Nejběžnější je klasický tupý spoj. Zkosené provedení zámku nepřináší žádné výhody ohledně utěsnění a jejich výroba je nákladnější. Šikmé provedení se používá jen výjimečně. Překrývající se zámek „S“ se používá jen u pomaluběžných motorů s velkým průměrem válců. Zámek s tzv. háčkem slouží k usnadnění montáže do těžko přístupných míst. Tyto kroužky se používají například pro hydraulické převodovky. [2]



Obr. 12 Typy provedení zámku pístního kroužku. [2]

2.4. Spotřeba oleje

Jedná se o změnu množství mazacího oleje v olejové vaně v průběhu času. Snížení spotřeby oleje lze provést úpravou pístních kroužků:

- Zvýšení kontaktního tlaku.
- Zvýšení přizpůsobivosti.
- Návrh ostré stírací hrany.
- Vyhnout se stírání pomocí horní hrany při pohybu nahoru.
- Snížení pulzování v drážce pístu. [2]

2.5. Materiály pístních kroužků

Žádný materiál nemůže splňovat všechny požadavky a vlastnosti, které by měl ideální materiál na pístní kroužky splňovat.

Materiál na pístní kroužky by měl mít co největší odolnost proti opotřebení. Při pohybu kroužku po stěně válce by měl mít co nejnižší koeficient tření a to i při zatížení ve všech

provozních teplotách. Měl by mít samomazné vlastnosti a co nejmenší sklon k zadírání s materiálem stěny válce. Materiál musí mít vyhovující pevnostní parametry. Musí vydržet jak pracovní napětí, tak i napětí potřebné k navlečení kroužku na píst. Je nutná určitá tvrdost a materiál musí odolat poměrně vysokým rázům od tlaku ze spalovací komory. Kroužek by měl být dostatečně pružný, aby dokázal vytvořit dostatečný přítlak na stěnu válce. Musí mít korozní odolnost proti prostředí, ve kterém pracuje, jako je palivo, olej, spaliny a vzduch. Měl by mít dostatečnou tepelnou stálost a tepelnou vodivost, aby splňoval požadavky na odvod tepla z pístu do stěny válce. [1]

2.5.1. Litina s lupínkovým grafitem

Velmi vhodným materiálem pro výrobu pístních kroužků je legovaná litina s lupínkovým grafitem. Tento materiál je tvrdý a křehký, ale díky grafitické fázi má velmi dobré kluzné vlastnosti. Tento materiál, ale již nestačí požadavkům výkonných moderních motorů. Proto se začaly používat jiné materiály. [3]

2.5.2. Litina s kuličkovým grafitem

Vysoké otáčky v moderních benzinových motorech a vysoké tlaky v přeplňovaných naftových motorech kladou zejména na nejvyšší těsnící pístní kroužek nároky, které materiály na bázi litiny s lupínkovým grafitem již nezvládnou. Proto jsou v těchto aplikacích použity kroužky z litiny s kuličkovým grafitem. Tento materiál prakticky vylučuje nebezpečí zlomení pístních kroužků. Nevýhodou tohoto materiálu oproti litině s lupínkovým grafitem jsou jeho horší kluzné vlastnosti, a proto se tyto kroužky používají výhradně jen s povrchovou úpravou. [1]

2.5.3. Ocel

Ocel jako materiál na pístní kroužky se používá jen s povrchovou úpravou a to pro speciální účely jako těsnící kroužky pro moderní benzinové motory a letecké motory. Na stírací kroužky se používá pro lamelové stírací kroužky a na expandery. [1]

Tab. 1 Přehled materiálů na pístní kroužky vyráběné ve firmě Buzuluk. [1]

Materiál	Koma 42 0060	Koma 42 0061	Koma 42 0065	Koma 42 0066
Druh materiálu	Šedá litina	Šedá litina	Šedá litina legovaná	Tvárná litina zušlechtěná
Třída	10	10	20	50
Modul pružnosti [GPa]	85 – 115	75 – 105	100 – 130	≥ 150
Pevnost v ohybu [N.mm ⁻²]	≥ 350	≥ 300	≥ 500	≥ 1300
Minimální tvrdost [HRB]	95 – 107	93 – 103	108 – 114	106 – 112
[HB]	205 – 290	195 – 260	300 – 380	280 – 360
Další informace	Bez tepelného zpracování	Bez tepelného zpracování	Tepelně zpracovaná	Tepelně zpracovaná

3. Opotřebení

Opotřebení je definováno jako nežádoucí změna povrchu nebo rozměrů tuhých těles, způsobená buď vzájemným působením funkčních povrchů, nebo funkčního povrchu a média, které opotřebení vyvolává. Projevuje se jako odstraňování nebo přemísťování částic hmoty z povrchu součásti mechanickými účinky, popřípadě doprovázenými i jinými vlivy (např. chemickými, elektrochemickými či elektrickými). Problematikou opotřebení se zabývá vědní obor – tribologie. [5]

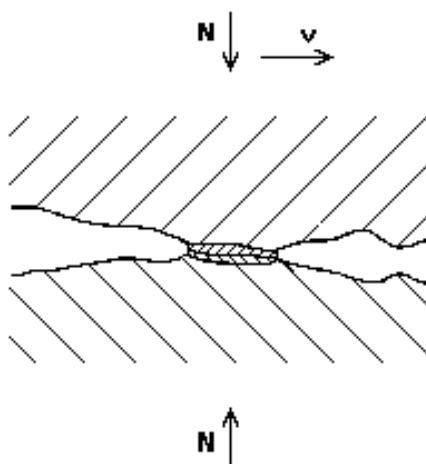
3.1. Adhezivní opotřebení

Adhezivní opotřebení je charakterizováno oddělováním a přemísťováním částic při pohybu funkčních ploch povrchů, které jsou ve vzájemném styku. Povrch těles není nikdy dokonale hladký, skládá se z mikronerovností. Při styku dvou povrchů nedochází k dotyku po celé ploše, ale dochází k velkému počtu dotyků na plochách nerovností. Vznik těchto stykových plošek je doprovázeno plastickou a elastickou deformací vrcholků nerovností. Dochází k porušování mikrospojů a často k přenosu materiálu z jednoho povrchu na druhý.

Faktory ovlivňující adhezivní opotřebení:

- Hloubka vniku a poloměr zakřivení mikronerovností.
- Zatížení a rychlost relativního pohybu.
- Schopnost materiálu vytvářet adhezivní spoje.

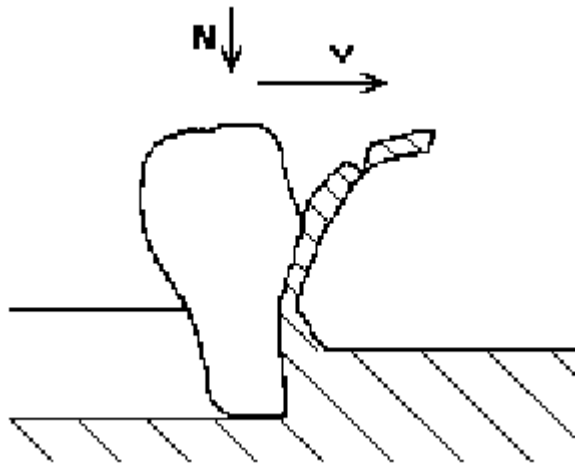
Proces adhezivního opotřebení závisí i na mnoha dalších faktorech, mezi které patří například zatížení, materiál stykových ploch a jejich fyzikálně mechanické a chemické vlastnosti, okolní prostředí, druh a typ mazání, velikost stykových plochů. Výrazným faktorem ovlivňujícím adhezivní opotřebení je okolní médium, na stykové plochy je výhodné aplikovat mazivo, které částečně odděluje stykové plochy a tím snižuje interakci mikronerovností. [6]



Obr. 13 Schéma mechanismu adhezivního opotřebení. [7]

3.2. Abrazivní opotřebení

U abrazivního opotřebení se jedná o vzájemný účinek povrchových nerovností jednoho tělesa v relativním pohybu vůči druhému, nebo účinek cizích tvrdých částic vůči funkčnímu povrchu jiného tělesa. Existují dva typy abrazivního opotřebení, a to mezi dvěma tělesy, to znamená například, když je jeden funkční povrch opotřebováván cizími částicemi. Druhá varianta je charakterizována interakcí tří těles, kdy mezi dva funkční povrchy vnikají cizí částice nebo nečistoty z okolního prostředí. Tento princip opotřebení se vyskytuje i u pístního kroužku a vložek válců u pístových strojů pracujících s nedostatečně čistým médiem. Typickým poškozením povrchu jsou rýhy. [5] [6]

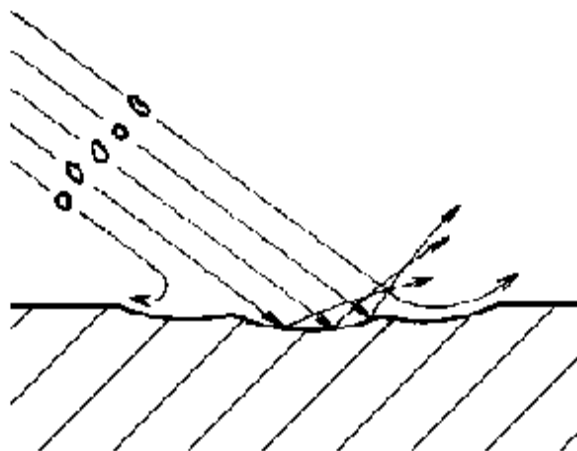


Obr. 14 Schéma mechanismu abrazivního opotřebení. [7]

3.3. Erozivní opotřebení

Erozivní opotřebení je poškozování povrchů součástí účinkem částic, které jsou unášeny buď plynným nebo kapalným médiem, nebo poškozování povrchu prostým prouděním plynu nebo kapaliny. Opotřebení částicemi nesenými proudem kapaliny se vyskytuje například u součástí čerpadel, trysek nebo vodních turbín. Částice nesené proudem plynu opotřebovávají například součásti ventilátorů a tryskačů.

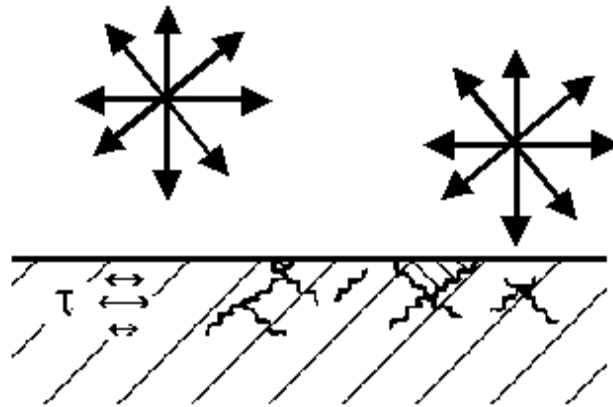
Erozivní opotřebení závisí především na médiu a částicích, ale i na exponovaném povrchu. Pro erozivní opotřebení je rozhodující kinetická energie a úhel dopadu částic. [5] [6]



Obr. 15 Schéma mechanismu erozivního opotřebení. [7]

3.4. Kavitační opotřebení

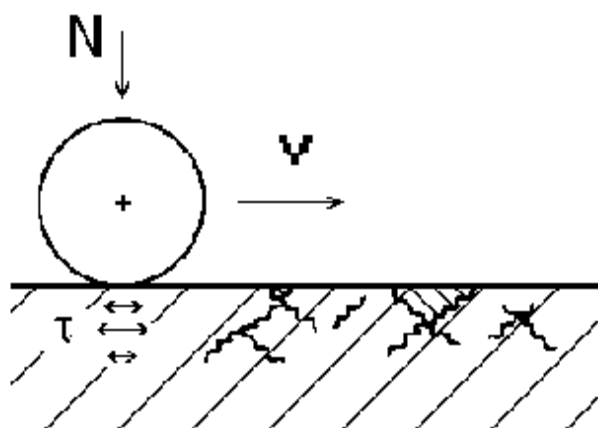
Kavitační opotřebení je charakterizováno oddělováním částic a poškozováním povrchu součástí v oblasti zanikání kavitačních dutin v kapalině. Kavitační dutiny vznikají tehdy, sníží-li se změnou rychlosti nebo podmínek proudění tlak v určité oblasti kapaliny tak, že se dosáhne při dané teplotě tlaku nasycených par. Ke kavitačnímu opotřebení dochází nejčastěji u vodních turbín a čerpadel, u nichž je nutno z důvodu účinnosti připustit, při proměnném průtoku či výkonu, běh zařízení i v podmínkách, při nichž dochází ke kavitaci. [6]



Obr. 16 Schéma mechanismu kavitačního opotřebení. [7]

3.5. Únavové opotřebení

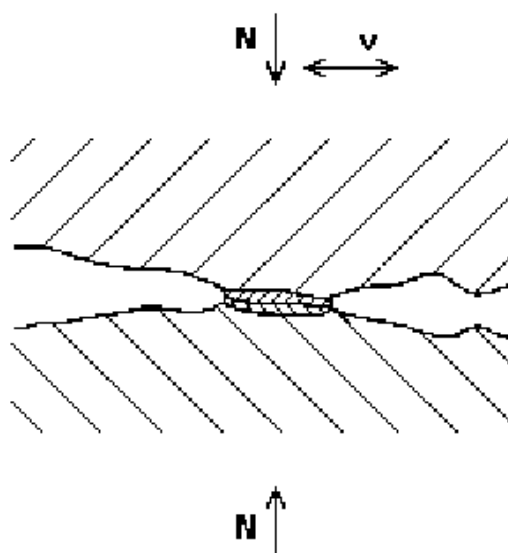
Únavové opotřebení vzniká při opakovaných silových účincích proměnného charakteru, především od smykových sil. Jde-li o napětí pod mezí kluzu, mluvíme o vysokocyklové únavě, při napětích nad mezí kluzu jde o případy nízkocyklové únavy. [6]



Obr. 17 Schéma mechanismu únavového opotřebení. [7]

3.6. Vibrační opotřebení

Vibrační opotřebení je charakterizováno oddělováním částic a poškozováním povrchu materiálu vzájemnými kmitavými tangenciálními posuvy funkčních povrchů těles při působení normálního zatížení. Minimální amplituda pohybu, postačující ke vzniku vibračního opotřebení, je 10^{-3} mm. Produkty opotřebení se hromadí mezi stykovými povrchy. [5] [6]



Obr. 18 Schéma mechanismu vibračního opotřebení. [7]

V praxi se často setkáváme s opotřebením, které je kombinací více typů opotřebení. Opotřebení jednoho druhu může napomáhat rozvíjení opotřebení jiného typu a to pak v některých případech může převládat nad původním mechanismem opotřebení. [6]

3.7. Příklady opotřebení – pístní kroužky a vložky válců

U spalovacích motorů dochází u dvojice pístní kroužek – vložka válce k působení kombinace adhezivního a abrazivního opotřebení a koroze.

V tomto případě se adhezivní opotřebení projevuje vytrháváním částeczek z pracovních ploch. Do válce se z ovzduší mohou dostat, pokud nesprávně pracuje vzduchový filtr, prachové částice, a ty společně s tuhými zplodinami hoření paliva zapříčiňují abrazivní opotřebení funkční dvojice pístní kroužek – vložka válce. [6]

4. Povrchové úpravy pístních kroužků

Cílem povrchových úprav je dosažení lepších vlastností povrchu součásti, a to zejména korozní odolnost, zvýšená odolnost proti opotřebení, zlepšení kluzných vlastností a zlepšení vzhledu součásti. [8]

4.1. Chemické povrchové úpravy

4.1.1. Fosfátování

Jedním ze způsobů chemické úpravy povrchu je fosfátování, při kterém se tvoří na povrchu předmětu souvislá, dobře zakotvená krystalická vrstva nerozpustných fosforečnanů. Při fosfátování se používají přípravky na bázi fosforečnanu zinečnatého, zinečnato-vápenátého a manganatého. [2]

Při fosfátování pístních kroužků se dává přednost fosfátu manganatému, který je tvrdší než fosfáty na bázi niklu. Používají se prostředky kyseliny fosforečné, doplněné o fosfáty manganu. Proces probíhá při teplotě 80 – 85 °C. [1]

Krystaly fosfátu drží velice pevně na základním materiálu. Během záběhu pístních kroužků se setřou z povrchu a ve spojení s olejem fungují jako lapovací pasta. Zbývající

fosfátová vrstva je porézni, pojme do sebe olej a slouží jako zásobník mazání v místech, kde by mohlo dojít k polosuchému tření a tím snižuje nebezpečí zadření.

Používá se pro malé i velké pístní kroužky. Jsou výrobní závody, které fosfátují celou produkci své výroby pístních kroužků. Je to zčásti proto, že jsou tím chráněny proti korozi, ale také proto, že se zlepšují záběhové vlastnosti. Fosfátují se proto zvláště pístní kroužky, určené jako náhradní díly. [1]

4.2. Chemicko-tepelné nanášení povlaků

4.2.1. Nitridace

Nitridování je tepelné zpracování, při kterém se dusík vstřebává při teplotě v rozmezí mezi 450 až 585 °C pro vytvoření vícefázové nitridované vrstvy. Nitridace je proces, který se používá zejména pro zvýšení výkonu pístních kroužků v benzínových motorech. Nitridace významným způsobem zvýší tvrdost a to má za následek snížení abrazivního a adhezivního opotřebení. [2]

4.2.2. Plazmová nitridace

Plazmová nitridace je podmíněna stejně jako jiné postupy nitridování přítomností atomárního dusíku na povrchu kovu. Za zvýšených teplot je tento atomární dusík schopný pronikat přes povrchovou adsorbční vrstvičku nitridů do mřížky základního kovu a difundovat dále do oceli.

Při iontové nitridaci jsou součásti zapojeny jako katoda a jsou uloženy izolovaně ve vakuové nádobě (recipientu), který je zapojen jako anoda a udržuje se v něm snížený tlak zředěné směsi plynů potřebných pro proces nitridace. Touto směsí je nejčastěji směs dusíku a vodíku N_2+H_2 . [9]

4.2.3. Sulfonitridace

Tento proces byl zaveden jako náhrada za nebezpečný proces sulfinizace. Provádí se v nitridačních pecích, které jsou současně upraveny na přívod sirovodíku. Při zahřání pece na 400 °C se vpouští čpavek NH_3 a po dobu 1,5 až 2 hodiny se současně vpouští sirovodík H_2S . Poté se uzavře přívod sirovodíku a nastává pozvolné chladnutí na 150 až 100 °C za

neustálého přívodu čpavku. Celý proces trvá asi 15 hodin (6 až 8 hod. zahřívání, 1,5 hod. na teplotě, 5 hod. chlazení). Takto zpracované kroužky mají lepší podmínky při záběhu v motoru. Při sulfonitridaci narůstají rozměry kroužku, proto je nutné kroužky ještě brousit na konečný rozměr. [1]

4.2.4. Ferrosování

Proces probíhá v uzavřené pecní komoře při teplotě cca 540 °C při přívodu oxidačního prostředku, jímž je v případě ferrosování vodní pára. Vrstva oxidů vzniklých při ferrosování se skládá ze dvou zón, které mají přibližně stejnou tloušťku. Vnější vrstva je světlejší a měkčí, toho se využívá při záběhu, kdy se snadno otírá a takto vzniklé částice společně s olejem působí jako brusná pasta. Díky tomu dochází k rychlejšímu záběhu pístních kroužků. Druhá, spodní část vrstvy, je tvrdší a pevně spojená se základním materiálem a zvyšuje otěruvzdornost pístních kroužků. Používají se především pro malé a středně velké kroužky. Ferrosováný povrch je tvrdší než fosfátovaný. [1]

4.3. Termické nástřiky

Při technologii termického nástřiku je přídavný materiál ve formě jemných natavených kovových i nekovových částic s dostatečnou kinetickou energií přemístěn na povrch základní součásti. Teplota součásti v místě nástřiku zpravidla nepřesáhne teplotu 150 °C. [9]

Proces termického nástřiku lze rozdělit do následujících tří fází [9]:

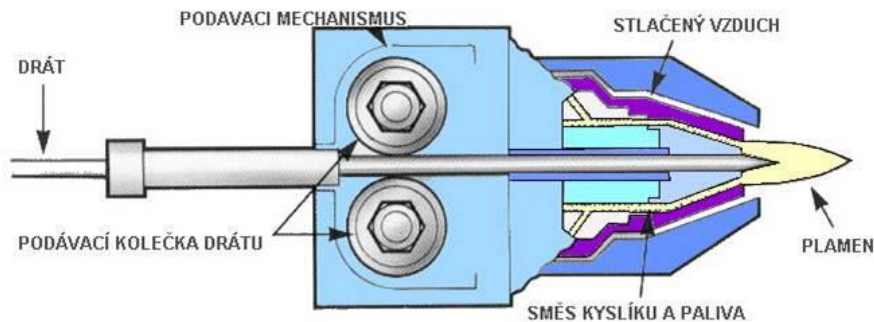
- Vznik a stabilizace tepelného zdroje a přívod přídavného materiálu do tepelného zdroje.
- Interakce částic s tepelným zdrojem.
- Tvorba povlaku – ukládání částic na povrch součásti, při kterém se kinetická a tepelná energie částic přenáší na součást.

Termické nástřiky se nejčastěji dělí podle použité tepelné energie [9]:

- Termický nástřik plamenem.
- Termický nástřik elektrickým obloukem.
- Termický nástřik plazmou.
- Termický nástřik detonací.

4.3.1. Termický nástřik plamenem

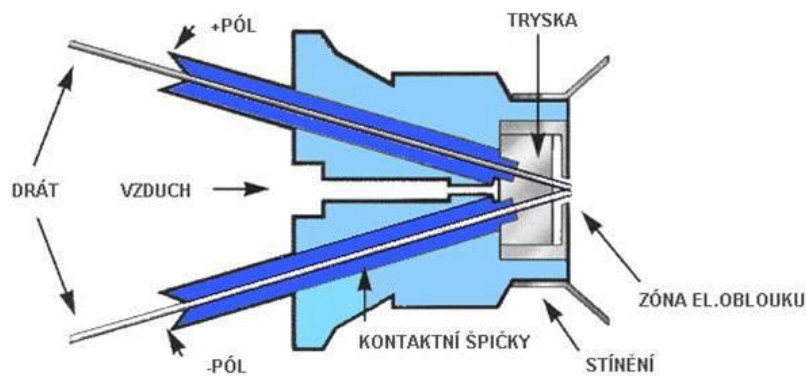
Zdrojem tepla při nástřiku plamenem je kyslíkoacetylénový plamen, který dosahuje teploty 3 200 K. Přídavný materiál se na povrch součásti nanáší dynamickým účinkem plamene. Rychlost dopadu částic dosahuje maximálně okolo $80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Nevýhodou této technologie je nízký sortiment použitelných přídavných materiálů. [9]



Obr. 19 Schéma nástřiku plamenem. [10]

4.3.2. Termický nástřik elektrickým obloukem

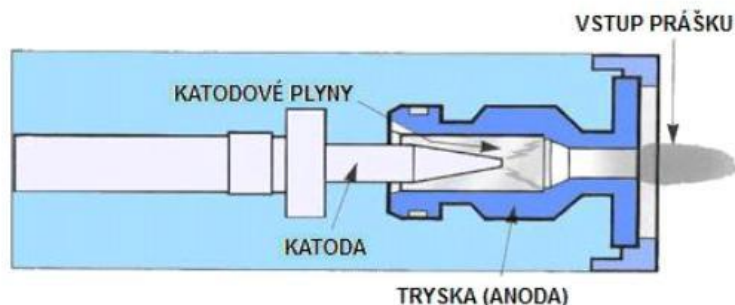
Zdrojem tepla je elektrický oblouk hořící mezi dráty z přídavného materiálu. Částice jsou na povrch součásti dopraveny pomocí stlačeného vzduchu. Elektrický oblouk dosahuje teploty až 5 000 K. Tato teplota je dostačující k natavení všech významných kovů a slitin z hlediska termického nástřiku. Výhodou této technologie je jednoduchost, nízké provozní náklady, mobilita a poměrně vysoký výkon, který dosahuje až $80 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$. [9] [10]



Obr. 20 Schéma nástřiku elektrickým obloukem. [10]

4.3.3. Termický nástřik plazmou

Zdrojem tepla je elektrický oblouk mezi wolframovou katodou a měděnou anodou, která zároveň tvoří i výstupní trysku. Elektrický oblouk hoří v plazmovém plynu. Ten je tvořen plynem inertním, což je většinou argon, a plynem, který zvyšuje entalpii plazmatu - například vodík, dusík, nebo helium (H_2 , N_2 , nebo He). Směs plynů vychází z hořáku s teplotou až $20\,000\text{ }^\circ\text{C}$. [11]



Obr. 21 Schéma nástřiku plazmou. [11]

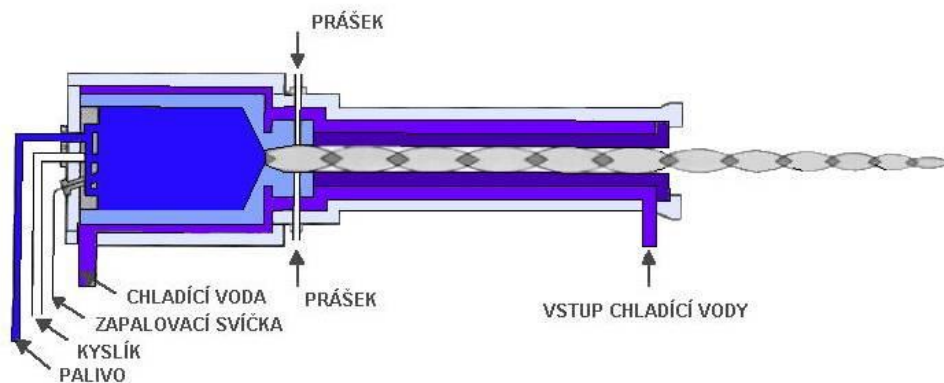
4.3.4. Termický detonační nástřik:

Detonační termický nástřik využívá energie detonační vlny, která vzniká explozí směsi hořlavého plynu většinou C_2H_2 a kyslíku. Do spalovací komory je přídavný materiál přiváděn ve formě prášku. Detonační vlna urychluje nástřikový materiál, který na povrch

součásti dopadá rychlostí až $800 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Částice dosahují teplot až kolem $3\,700 \text{ K}$. Tato technologie je velmi hlučná, proto je potřeba vytvořit izolované pracoviště. [9]

4.3.5. HVOF (High Velocity Oxygen Fuel) nástřik

HVOF je varianta, ve které spaliny na konci trysky hořáku prudce expandují, a tím dochází k jejich značnému urychlení. Teploty potřebné k natavení je dosahováno spalováním směsi kyslík – palivo (propan, acetylen, vodík, propylen, kerosin). Rychlost částic se pohybuje okolo 600 až $1\,000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Hlavní předností HVOF povlaků je vysoká přilnavost, nízká pórovitost ($<1\%$) a nízký obsah oxidů ($<1\%$). [10]



Obr. 22 Schéma nástřiku HVOF. [10]

4.3.6. Termické nástřiky pro pístní kroužky

Stříkané povlaky na pístní kroužky mají přednost oproti chromování u kroužků v horní drážce především u motorů (především dieselové motory), kde je zvýšené riziko otěru. Materiály, uložené pomocí nástřiků, mohou lépe odolávat tomuto adheznímu opotřebení způsobeného přímým kontaktem kov-na-kov. [2]

Materiály používané pro pístní kroužky se pohybují od molybdenu, který má tendenci k nízké přilnavosti, přes kovokeramické kompozitní povlaky až k celokeramickým systémům.

Ve většině aplikacích dnes převládají kovo-keramické kompozitní povlaky, zatímco molybdenové povlaky jsou nyní používány jen občas vzhledem k jejich poměrně nízké odolnosti proti opotřebení. Celokeramické nástřiky budou hrát významnou roli v budoucnosti, pokud se podaří snížit typickou křehkost keramiky. [2]

4.4. PVD vakuové naprašování

Vzhledem k charakteru keramických povlaků jsou pístní kroužky s PVD povlakem mimořádně odolné proti otěru a mimořádně odolné proti opotřebení. PVD povlaky výhodné pro pístní kroužky jsou založeny na systému CrN. Alternativní materiálové systémy jako DLC (Diamond-Like Carbon) jsou stále více využívány s cílem snížit tření. [2]

5. Chromování

5.1. Dekorativní chromování

Používá se pro ozdobné a ochranné pokovení. Pro zvýšení korozní odolnosti se aplikují nejčastěji v kombinaci s niklem nebo mědí. Tloušťka těchto povlaků se pohybuje mezi 0,2 – 0,5 μm .

5.2. Tvrdé (funkční) chromování

Tvrdé chromování je velmi používanou a významnou povrchovou úpravou vybraných strojních součástí. Používá se pro zmenšení opotřebení a zvýšení životnosti součástí, nástrojů a měřidel. Tvrdé chromování je elektrochemický proces, v jehož průběhu dochází k nanesení vrstvy chromu na základní materiál. Těmito základními materiály mohou být ocel, mosaz, litina a některé nerezové oceli.

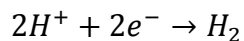
Vyloučený povlak chromu dosahuje tvrdosti 800 až 1 200 HV a je schopný dalšího opracování. Tvrdé chromování je nanášení povlaku chromu na součástky, které trpí nadměrným opotřebením a otěrem. Po nanesení předepsané vrstvy se obvykle součástka vybrousí na daný rozměr. Díky této technologii lze zrenovovat součástku, která opotřebením ztratila své vlastnosti a rozměr. Tvrdé chromování se používá i na pístní kroužky a chrom slouží jako matrice pro kompozitní chromové povlaky. [8] [13]

5.2.1. Složení a vlastnosti vrstvy

Chemický proces v lázni [14]:

1. $Cr^{6+} + 3e^{-} \rightarrow Cr^{3+}$
2. $2CrO_3 + 6H^{+} + 6e^{-} \rightarrow Cr_2O_3 + 3H_2O$
3. $Cr_2O_3 + 2H^{+} + 2e^{-} \rightarrow 2CrO + H_2O$
4. $2CrO + 4H^{+} + 4e^{-} \rightarrow 2Cr + 2H_2O$

A současně vylučování vodíku:



5.2.2. Vlastnosti vrstvy

Chrom je šedavě bílý kov, tvrdý a křehký. Může být leštěný do velmi vysokého lesku a může vzniknout namodralý nádech.

Hlavní vlastnosti, pro které se chromování používá:

- Vysoká tvrdost (odolnost proti mechanickému opotřebení) cca 1 000 HV (69 HRC).
- Vysoká otěruvzdornost.
- Nepřilnavý povrch.
- Nízký součinitel tření.
- Paramagnetické vlastnosti.
- Vzhled a dekorační vlastnosti.
- Dobrá korozní odolnost. [12]

Tab. 2 Fyzikální vlastnosti. [16] [12]

Hustota	6,90 – 7,18 g.cm ⁻³
Atomová hmotnost	52,01
Atomové číslo	24
Bod tání	1 850 °C
Tepelná vodivost	0,67 W.cm ⁻¹ K ⁻¹
Tvrdost	850 – 1 050 HV
Mez pevnosti	200 MPa
Magnetické vlastnosti	nemagnetický
Koeficient tření (proti oceli)	0,16 – mazání -0,21 – suché

5.2.3. Tloušťka povlaku

Tloušťka chromového povlaku se pohybuje od 5 μm až do cca 1 mm. Jednou z výhod tvrdého chromování je možnost nanášet silné vrstvy a proto se často používá na renovaci opotřebovaných částí. [15]

- Tloušťka do 30 μm – bez následného opracování, v závislosti na požadované rozměrové toleranci se může obrábět leštěním.
- Tloušťka do 60 μm – s následným broušením.
- Tloušťka do 300 μm (a více) – s následným broušením, pro repase – chrom nahrazuje úbytek materiálu. [16]

Tenčí povlaky jsou používány pro podstatné zvýšení životnosti komponentů, zvýšení odolnosti proti opotřebení a jako korozní ochrana. Silnější chromové povlaky se používají pro opravu opotřebovaných starých součástek a poškozených nebo nepřesně vyrobených nových dílců.

5.3. Princip galvanického tvrdého chromování

Oproti ostatním způsobům galvanického pokovování mají chromové lázně velmi nízkou hloubkovou účinnost i katodický proudový výtěžek. Do lázně není chrom dodáván díky rozpouštění chromové anody, ale pomocí vyloučení z kyseliny chromité z lázně. Z anody by se do lázně uvolňoval trojmocný chrom Cr^{3+} a to je ve větším množství nevhodné, protože pro vylučování povlaku na povrchu součásti je nutná přítomnost šestimocného chromu Cr^{6+} . Pro dosazování lázně se používá oxid chromový CrO_3 , který s vodou tvoří kyselinu chromovou H_2CrO_4 . Anody se používají většinou olovené s legurami jako cín a antimon. Výhodné je použít chrominové anody (olovo legované stříbrem). Chromovací lázně obsahují určité množství trojmocného chromu dodané při nasazování lázně. Nasazené množství je udržováno rovnováhou mezi redukcí Cr^{6+} na katodě a oxidací Cr^{3+} na anodě. Rovnováha se ustaví při koncentraci okolo 5 g.l^{-1} oxidu chromitého. Toto množství je považováno za optimální pro chromování. Jeho nedostatek či přebytek působí negativně, značně snižuje tvorbu povlaku ve stíněných místech (v místech kde je nízká proudová hustota). [8] [13]

Tvrdé chromování se řídí podle normy ČSN EN ISO 6158 – Kovové povlaky – Elektrolyticky vyloučené povlaky chromu pro technické účely.

5.4. Chromovací lázně

Základní složkou chromovacích lázní je oxid chromový, u tvrdého chromování je jeho koncentrace 200 – 300 g.l⁻¹. Velice důležitou složkou chromovacích lázní jsou katalyzátory. Primárním katalyzátorem jsou sírany, které se dostávají do lázně pomocí kyseliny sírové. Optimální složení základní lázně je 250 g.l⁻¹ CrO₃ a 2,5 g.l⁻¹ H₂SO₄. Kromě síranů mají katalytický vliv jednoduché fluoridy a komplexní soli obsahující fluoroboritanový nebo fluorokřemičitanový aniont. Díky těmto látkám se zvyšuje katodický proudový výtěžek, ale zároveň výrazně zvýší agresivitu elektrolytu vůči základnímu materiálu. Následkem toho dochází ke zvýšenému rozpouštění materiálu chromované součástky do chromovací lázně a dochází k jejímu znehodnocení balastními kovy. Kvůli nárůstu znečištění dochází ke zvyšování svorkového napětí a tím i zvýšení spotřeby elektrické energie. Nejnovějším trendem jsou organické, sekundární katalyzátory. Jsou to hlavně alkyl sulfonované kyseliny a jejich deriváty. Jsou používány v kombinaci s primárním katalytickým účinkem síranů. [13]

Tab. 3 Porovnání katodových výtěžků u lázní pro funkční chromování. [13]

Typ funkční chromovací lázně	Katodový proudový výtěžek v %
Běžná síranová – 1. generace	10 – 13
Fluoridová – 2. generace	18 – 22
S organickým katalyzátorem – 3. generace	24 – 28

Tab. 4 Porovnání průmyslového využití jednotlivých typů lázní pro funkční chromování. [13]

Typ funkční chromovací lázně	Podíl v % v roce 2009
Běžná síranová – 1. generace	30 – 35
Fluoridová – 2. generace	5 – 10
S organickým katalyzátorem – 3. generace	65 – 55

Největší nevýhodou tvrdého chromování je zcela jistě neekologičnost celého procesu. V průběhu povlakování jsou používány sloučeniny obsahující šestimocný chrom. Ačkoli kovový chrom a třímocné chromové sloučeniny nejsou toxické, šestimocné sloučeniny chromu jsou velmi nebezpečné. Chrom patří mezi látky s nejvyšším potenciálem ke

způsobení rakovinových onemocnění. Příprava kyselinové lázně vyžaduje používání vysokého stupně ochrany pracovníků. [17]

5.5. Vady při tvrdém chromování

Při chromování se setkáváme s řadou závad na vyloučeném funkčním povrchu.

Tab. 5 Nejčastější závady při tvrdém chromování. [23]

Závada	Předpokládaná příčina
Povlak se nevylučuje	Vysoký obsah kyseliny Nízká proudová hustota Vysoký obsah rozpouštěných kovových nečistot
Nedokonale vyloučený povlak	Nevhodná konstrukce závěsu, např. příliš masivní Vysoký obsah kyseliny sírové Nízký obsah příslušného katalyzátoru Vysoký obsah železa v elektrolytu Vysoký obsah Cr ³⁺ v elektrolytu
vyloučený povlak je drsný	Nízká teplota elektrolytu Nízký obsah kyselin Vysoký obsah železa nebo Cr ³⁺ Porézní základní materiál
Vyloučený povlak je silně pokryt tendrity a výrůstky	Nízká teplota elektrolytu U nekatalyzovaných elektrolytů chybí Cr ³⁺ a je vysoký obsah kyseliny sírové
Vyloučený povlak obsahuje póry a důlky	Porézní základní materiál Nevhodná předúprava, znečištěný povrch Zakovený vodík
Vyloučený povlak je drsný, matový a vykazuje „písčitou“ strukturu	Nízký obsah oxidu chromového v elektrolytu Velmi nízký obsah kyseliny sírové (<0,6 %) Zakotvené mechanické nečistoty Příliš hrubě opracovaný povrch dílů Porézní základní materiál Vysoký obsah železa v elektrolytu
Vyloučený povlak je šedivě matový, křehký	Nízká teplota elektrolytu Použita vysoká proudová hustota Vysoký obsah Cr ³⁺ v elektrolytu
Vyloučený povlak je měkký a mléčný	Vysoká teplota elektrolytu Použita nízká proudová hustota

5.6. Kompozitní Cr povlaky

Tvrdé chromování pístních kroužků se používalo již ve 30. letech minulého století. Tvrdé chromování výrazně snižuje opotřebení pístního kroužku a snižuje tření tribologického systému pístní kroužek – vložka válce. V současnosti se tvrdé chromování stále používá a to na pracovní plochy těsnících i stíracích kroužků.

V současnosti se klade důraz na snižování emisí a zvyšování výkonů motorů a zvyšují se požadavky na životnost všech komponentů spalovacích motorů. Tyto požadavky mají významný vliv na návrh pístních kroužků, na jeho průřezy a velikosti, a samozřejmě také na pracovní povrch.

Výše uvedené důvody vedly k použití porézního chromování. Tento typ chromové vrstvy se vyrábí pomocí periodické změny polarity při elektrochemickém pokovení. V povrchové vrstvě vznikají mikrotrhliny, které slouží k zachycení mazacího oleje a tím dochází ke zlepšení tribologických vlastností systému pístní kroužek – vložka válce. Vývoj dalšího vylepšování chromových povlaků vedlo k přidávání tvrdých částic do chromové matrice a tím vznikly kompozitní chromové povlaky. Ve srovnání se standardním chromem se kompozitní povlak vyznačuje zejména vyšší odolností proti opotřebení. [18]

Funkční podmínky pístních kroužků

U naftových motorů jsou pístní kroužky vystaveny teplotě přesahující 250 °C a u benzinového až 270 °C.

5.7. Tvrdé chromování pístních kroužků

Katodické proudové hustoty se pohybují v intervalu 50 – 80 A.dm⁻². Jelikož je velká část výrobků z litiny, má zásadní vliv na přilnavost a kvalitu povlaku anodické zdrsnění. Při tomto postupu se před začátkem chromovacího procesu elektrochemicky naleptá povrch výrobku. [18]

Postup chromování pístních kroužků je následující:

- Tryskání (voda + korund A-96 F220).
- Tlakové mytí.
- Pasivace v kyselině chromové ($20 - 80 \text{ g.l}^{-1}$).
- Maskování přípravků.
- Zavěšení na katodovou tyč.
- Transport do chromovací vany.
- Anodické naleptání.
- Proudový náraz.
- Chromování.
- Několikastupňový oplach.

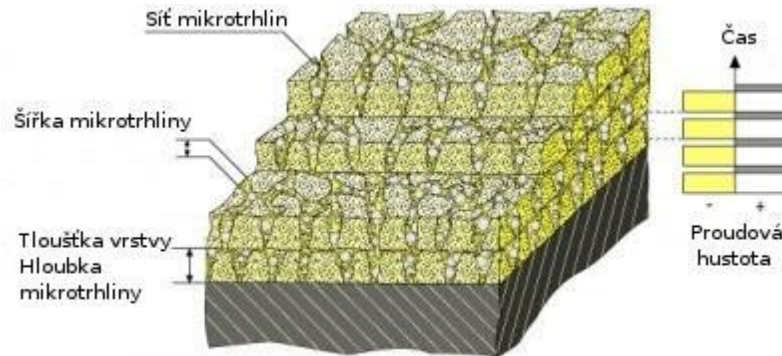
Pístní kroužky se chromují ve staženém stavu a jsou upevněny na trnu. Finální vrstva chromu se pohybuje mezi 40 – 150 mikrometry. Protože se po chromování pístní kroužky ještě brousí a honují, musí se chromovat vrstva 90 – 200 mikrometru. [18]



Obr. 23 Chromovací trn s pístními kroužky (Buzuluk)

5.8. Kompozitní chromové povlaky pro pístní kroužky

Přidané částice mohou zvýšit užité vlastnosti materiálu, případně přidat nové vlastnosti (magnetismus, katalytické vlastnosti...).

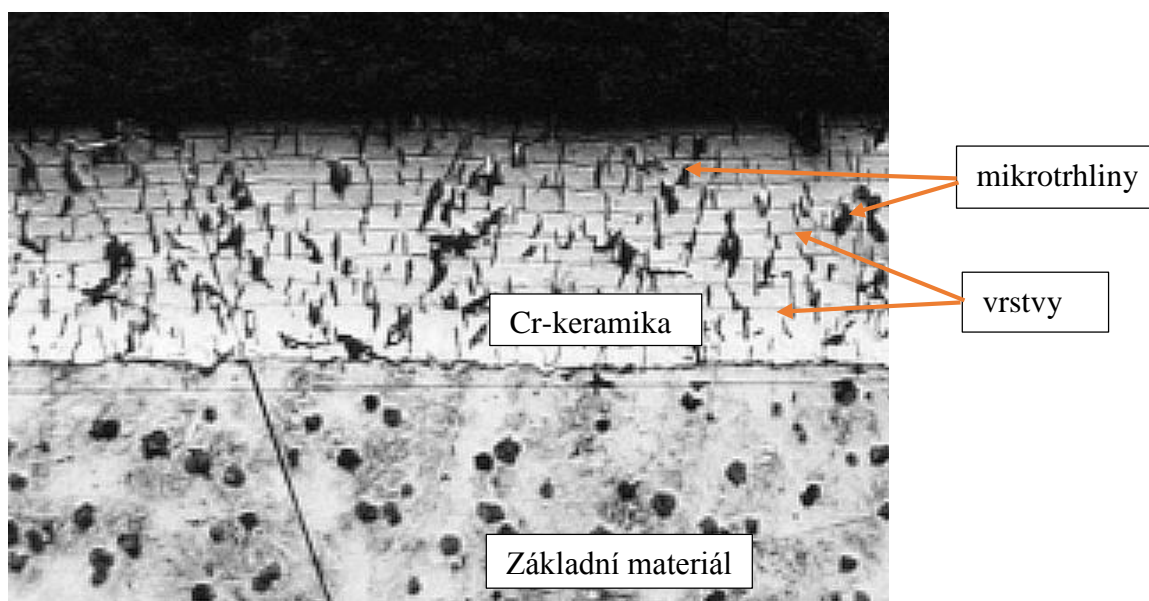


Obr. 24 Schéma chromového povlaku vyztuženého tvrdými částicemi. [2]

5.8.1. Princip vylučování

Kompozitní chromování se provádí v lázni o stejném složení jako pro klasický tvrdý chrom, navíc jsou přidány jen částice plniva. Tyto částice je potřeba rovnoměrně rozptýlit, k tomu mohou sloužit různé druhy míchání lázně jako ejektorové míchání, mechanické míchání nebo míchání pomocí stlačeného vzduchu.

Samotný proces kompozitního chromování probíhá pomocí cyklování, během kterého je měněna polarita chromovacího proudu. Díky cyklování vznikají mikrotřliny, které při aplikaci na pístní kroužky slouží jako zásobárny oleje. Jejich další funkcí je, že se do nich při kompozitním chromování zabudovávají částičky plniva. [18]



Obr. 25 Příčný výbrus chromového povlaku vzniklého pomocí cyklování s částicemi Al_2O_3 .

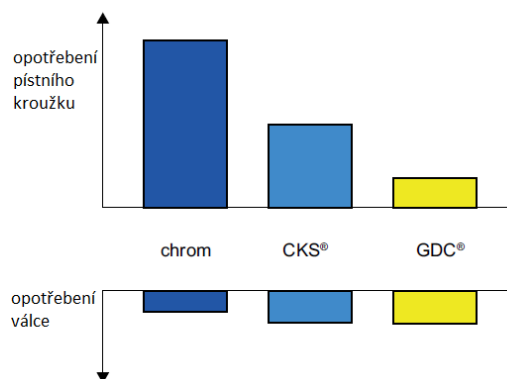
5.8.2. Plniva

Se stále se zvyšujícími nároky na zatížení moderních spalovacích motorů, je často potřeba zvýšit tepelnou a mechanickou únosnost pístních kroužků a jejich povrchových úprav.

Proto byly vyvinuty povlaky CKS a GDC, které mají síť trhlin, které se rozprostírají buď částečně skrz tloušťku povlaku, nebo zcela skrz povlak, v závislosti na požadavcích. A zároveň jsou vyztuženy uloženými tvrdými částicemi.

Varianta CKS byla vyvinuta firmou Goetze speciálně pro pístní kroužky v horní drážce, především pro vysoce přeplňované vznětové motory. Tento povlak má síť trhlin a je naplněn keramickými částicemi (Al_2O_3). Ve srovnání s klasickým tvrdým chromováním má tento povlak asi o 50 % nižší míru opotřebení a významně se zlepšila ořezuvzdornost. [2]

Varianta GDC byla vyvinuta firmou Goetze pro extrémní zatížení motoru. Jedná se o tvrdý povlak vyztužený částicemi diamantu, zabudovanými v extrémně jemné síti trhlin. Ve srovnání s CKS opotřebení povlaku kleslo na polovinu a ořezuvzdornost se také zlepšila, aniž by rostlo opotřebení válce. [2]



Obr. 26 Porovnání opotřebení povrchových úprav. [2]

V oblasti disperzních částic se stále vyvíjejí nová vylepšení jejich vlastností a užitných vlastností pro danou kompozitní povrchovou úpravu. Jako vhodné částice pro galvanické chromování se jeví nanočástice diamantu.

5.8.3. Nanodiamantové částice

Firma Carbodeon nabízí nanočástice diamantu s různými vlastnostmi, které slouží ke zlepšení vlastností povrchu. Částice jsou funkcionalizované a nesou povrchový náboj, což jim umožňuje společné uložení společně s kovovými ionty. Díky těmto částicím získává povrch několik výhod. Jednou z výhod je například zvýšení odolnosti proti otěru až o 200 %, zlepšení odolnosti proti korozi a snížení tření. Nanodiamantové částice se vyrábějí s ohledem na použití v různých velikostech a s různými vlastnostmi. [32]

Aplikace pro pokovování při pH < 3

Pro tyto aplikace, mezi které patří například i tvrdé chromování, se dodávají a používají nanodiamantové částice jejichž povrch má Zeta pozitivní náboj. Nanodiamantová ložiska v pokovené vrstvě jsou relativně velká, mezi 100 nm až přibližně 1 mikrometr, a jsou rovnoměrně rozložena. Tyto nanočástice zlepšují odolnost proti opotřebení a snižuje tření. Může být i zlepšena odolnost proti korozi, protože částice jsou uloženy v mikrotrhlinách pokovené vrstvy a tím snižují průchod okolního prostředí skrze

pokovené vrstvy. Koncentrace diamantových nanočástic v elektrolytu je obvykle udržována na 10 g.l⁻¹. [32]

Aplikace pro pokovování při pH > 3

Při těchto hodnotách pH se používají plně rozptýlené nanočástice o rozměrech 3 – 6 nm se silně pozitivním Zeta potenciálem. V tomto případě jsou nanodiamantová ložiska v pokovené vrstvě menší než 10 nm. Vzhledem k tomu, že depozice je v řádech nanometrů, může být požadované koncentrace v elektrolytu i tak nízké, že se mohou pohybovat okolo 0,1 g.l⁻¹ nebo i nižší. Hlavní aplikace jsou pro strojní součásti a elektroniku, s použitím například elektrolytického niklování a chemického niklování. [32]

Nanočástice diamantu se používají i při eloxování, kde přidání nanočástic diamantu prokázalo významné zlepšení odolnosti proti opotřebení a snížení tření. [32]

Pro aplikaci při galvanickém chromování firma Carbodeon doporučuje nanodiamantové částice s označením uDiamond Vivace.

Tab. 6 Vlastnosti částic Carbodeon uDiamond® Vivace. [32]

Velikost nanodiamantových krystalů	4-6 nm
Obsah nanodiamantových částic	≥ 97 % hm.
Obsah oxidovatelného uhlíku	≤ 2,5 % hm.
Obsah kovových nečistot	≤ 1,2 % hm.
Měrný povrch	330 m ² .g ⁻¹
Konstanta krystalové mřížky	0,3573 ± 0,0005
pH suspenze	4-8
Koncentrace nanodiamtů v disperzi	5 hm. %
Zeta potenciál	pozitivní

5.8.4. Částice korundu Al₂O₃

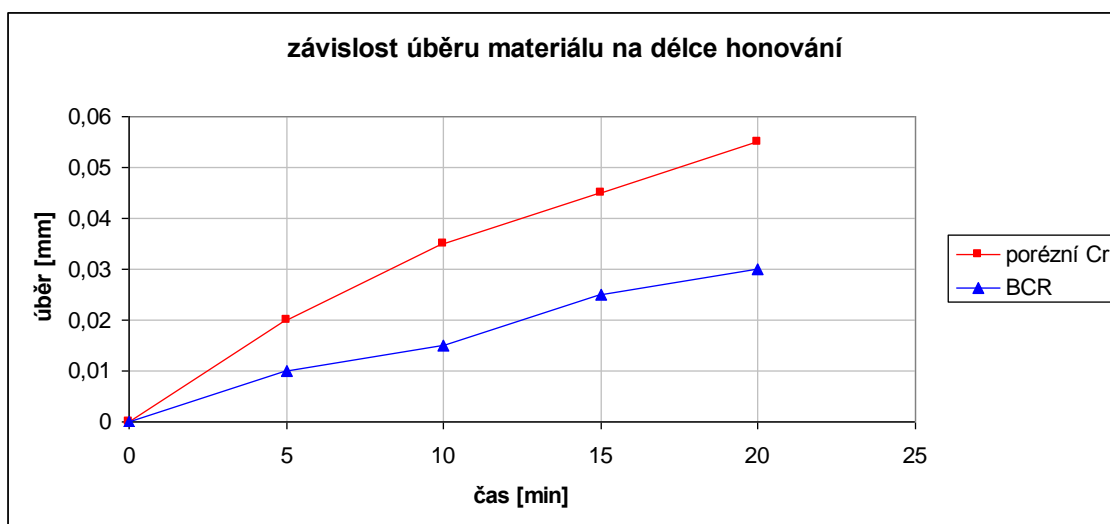
Pro použití na kompozitní chromové povlaky se používá vysoce jemný korund Al₂O₃ s označením F 1500 dle normy FEPA standard 42-2: 2006. Používaný korund je vysoké kvality a obsahuje až 99 % Al₂O₃.

Tab. 7 Chemické složení korundu A99 F 1500. [27]

A96 F 1500	Chemické složení [%]						
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	NaO	CaO	H ₂ O	MgO
	99,3	0,019	0,026	0,27	0,03	-	-

Bílý korund se vyrábí tavbou bauxitu v obloukových pecích při teplotě 2 000 °C a obsahuje minimální množství volného železa. Střední velikost používaných částic s označením F 1500 je $2 \pm 0,4 \mu\text{m}$. Třídění takto jemných částic Al₂O₃ probíhá pomocí sedimentace ve vodní lázni. [27]

Použitím mikročástic korundu A96 F 1500 je docíleno oproti poréznímu chromovému povlaku lepší odolnosti proti opotřebení.



Graf 1 Porovnání úbytku chrom-keramické vrstvy a porézního chromu při honování.

[28]

5.8.5. Budoucnost kompozitních Cr povlaků

I když kompozitní chromové povlaky mají dobré vlastnosti a mají co nabídnout, dochází k přechodu k nitridovanému pístnímu kroužku s PVD vrstvou. Důvodem je snižování cen PVD technologie a neekologičnost galvanického chromování. Výhodou PVD vrstev je velké množství modifikací. Ve spojení s ocelovými pístními kroužky se PVD povlaky stále více uplatňují u těsnících pístních kroužků. Chromované a kompozitně chromované pístní kroužky stále mají uplatnění na stíracích pístních kroužcích a v aplikacích některých diesellových motorů. [18]

6. Míchání elektrolytů

Existují různé důvody, proč je míchání lázně důležité při galvanickém pokovení. Míchání zajišťuje stálý přísun iontů k podkladu a konstantní doplňování čerstvého roztoku kolem substrátu často usnadňuje pokovení při vyšším proudu a teplotě. Dále pomáhá rozptýlit vodík vznikající na katodě. Pomáhá k rozptýlení tepla vzniklého elektrolýzou při pokovování. Dobré míchání pomáhá ke stejnorodosti teploty v celém objemu elektrolytu. Zabraňuje usazování pevných částic a kalů. Při kompozitním pokovování zabraňuje usazování částic a kalu a napomáhá k rovnoměrnému rozložení částic kolem součásti. [19] [20]

6.1. Běžné metody míchání

Míchání pomocí stlačeného vzduchu – kompresor nebo dmychadlo generuje vzduch, který je pomocí trubek uspořádaných na dně nádrže přiveden do lázně, a následně probublává a míchá lázeň.

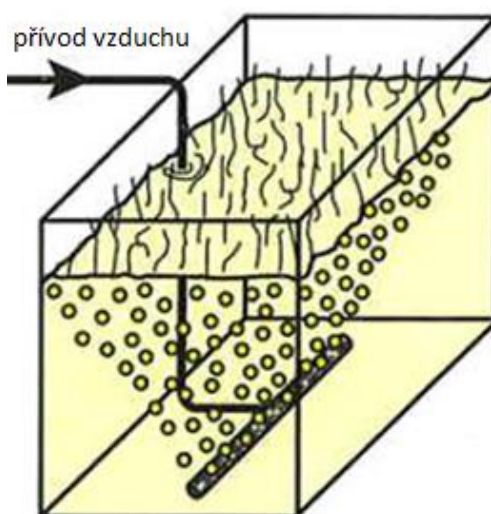
Pohyb katodové tyče – mechanický, příčný pohyb katodové tyče v celé své délce.

Ultrasonické – používá se hlavně v odmašťovacích a čisticích prostředcích.

Míchání pomocí ejektoru – turbulentní proudění kapaliny. [21]

6.2. Míchání pomocí vzduchu

Míchání pomocí vzduchu se používá již mnoho let a existuje řada problémů, které tuto metodu provázejí. Problémem jsou malé otvory v potrubí, které jsou náchylné na ucpávání. Tento jev je velice dobře poznat na hladině nádrže, kde je vidět že se lázeň v jedné části skoro nepohybuje a v jiných oblastech ano. To může být nežádoucí pro celkový výkon procesu pokovení. Při míchání vzduchem dochází k probublávání vzduchu na povrch lázně, díky tomu vzniká na povrchu lázně pěna a vznikají nebezpečné výpary. Tyto výpary vytvářejí nepříjemné a potenciálně nebezpečné prostředí pro práci. Proto je důležité odsávání v oblasti vany. Výpary mohou mít nepříjemný dopad na zařízení budovy a na zdraví operátorů v chromovně. Proudící vzduch lázni lázeň ochlazuje a zvyšuje to požadavky na udržování provozní teploty lázně. Nevýhodou míchání lázně pomocí stlačeného vzduchu je možnost vniknutí nežádoucích látek do pracovního prostoru (elektrolytu) jako je například olej ze zdroje stlačeného vzduchu nebo cizí částice ze vzduchu. Významnou nevýhodou samozřejmě je také neefektivní a nákladná výroba stlačeného vzduchu. [21]

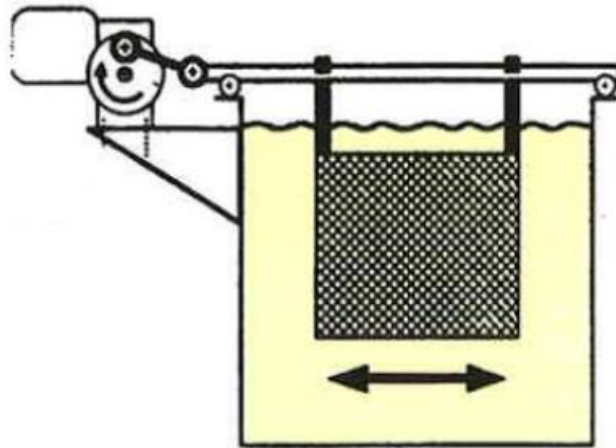


Obr. 27 Schéma míchání pomocí vzduchu. [22]

6.3. Míchání pohybem elektrody

Při tomto principu míchání musí být katodová tyč delší kvůli dopřednému a zpětnému pohybu. Kvůli pohybu katody je omezen a zkrácen katodový prostor. Nedostatkem je, že míchání probíhá pouze v úzkém prostoru kolem anody a ne v celém objemu lázně. Jedná

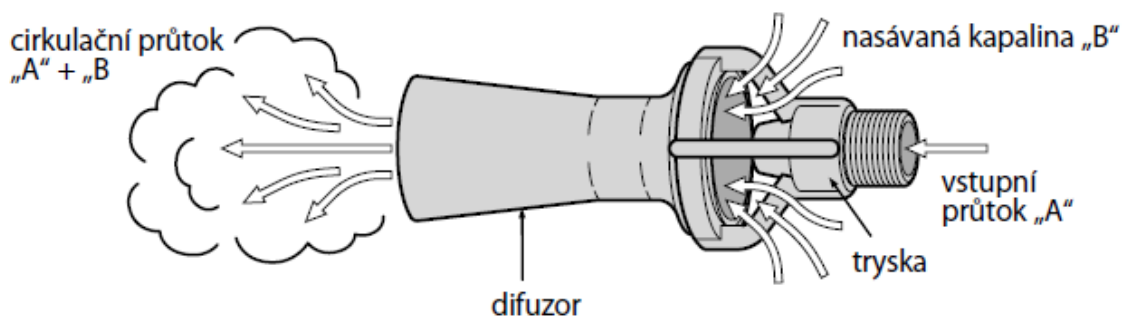
se o pomalý pohyb ve směru délky tyče. Jakýkoliv rychlejší pohyb je nežádoucí s ohledem na rozhoupání zavěšených součástí. Katodová tyč musí přenést proud a tím se ohřeje. Zrychluje se koroze těchto pohybujících se částí, proto při míchání pomocí pohybu katodové tyče bývá obvykle problém s údržbou. [20] [23]



Obr. 28 Schéma míchání pomocí pohybu elektrody. [22]

6.4. Míchání pomocí ejektoru

Ejektorové trysky převádí vysoký tlak, vysoké rychlosti a nízký objem na nízký tlak, nízké rychlosti a vysoký objem průtoku. Ejektory zvyšují pomocí nasávání okolního roztoku přibližně pětikrát průtokový objem oproti objemu roztoku přiváděného z čerpadla.



Obr. 29 Schéma proudění v ejektoru. [29]

Vytváří uzavřenou smyčku míchání. Míchání může být poměrně snadno směřováno pomocí různého umístění a namíření trysek. Trysky umožňují konstantní pohyb celé nádrže a zajišťují směs homogenní tekutiny v celé nádrži. Ejektorové míchání zajišťuje

jednotnost směsi jako je teplota, úroveň pH, rozložení pevných částic. Umožňuje použití poměrně malých čerpadel pro míchání velkého objemu nádrže. Tím se samozřejmě snižují náklady na míchání, protože menší čerpadla jsou méně nákladná jak na nákup, tak na provoz. Zjednodušují provoz a údržbu například pohyblivých dílů. Eliminuje se potřeba stlačeného vzduchu a možné znečištění olejem a snižují se problémy s odvětráváním pracovního prostoru. [21]

Zlepšení procesu míchání použitím ejektorových trysek:

- Emise škodlivých plynů snížena o více než 90 %.
- Tepelné úspory až 25 %.
- Rovnoměrnější jas a tloušťka povlaku.
- Zlepšené vyloučení ve slepých oblastech.
- Snížení důlkové koroze.
- Eliminuje teplotní rozvrstvení. [21]

6.5. Mechanické míchání

Vrtule na mechanické míchání je poháněna elektromotory s proměnnou rychlostí a to je výhodné pro ovládání procesu míchání. Ale důležitější je tvar míchací vrtule a její poloha. Nevýhodou této metody míchání je poměrně značná náročnost na prostor. [20]



Obr. 30. Ukázka zařízení pro mechanické míchání. [30]

Metoda míchání galvanických lázní má vliv na rychlost tvorby povlaku. Z tabulky (8) je patrné, že způsob míchání má značný vliv na množství vyloučeného kovu. Z hodnot faktoru navýšení je zřejmé, že je vhodným způsobem míchání galvanické lázně míchání pomocí ejektorových trysek, které vykazuje největší faktor navýšení. [20]

Tab. 8 typických hodnot EF – faktoru navýšení. [20]

Typ míchání	EF – faktor navýšení
Žádné míchání	1
Vratný pohyb katody	2
Mechanické míchání	2 – 10
Pomocí vzduchu	2 – 6
Vibrační míchání	3 – 30
Tryskání a ejektorové míchání	5 – 30

7. Experimentální část

Experiment se zabývá problémem s mícháním lázní pro kompozitní galvanické povrchové úpravy. Přesně se jedná o problematiku kompozitního galvanického chromování, kdy jsou do klasické chromovací lázně přidány částice korundu Al_2O_3 , hovoří se o tom jako o chrom-keramice. Problémem v provozu při chromování ve firmě Buzuluk je usazování korundu na dně nádrže a neschopnost dosavadního systému míchání tyto částice opětovně rozmíchat. Doposud se míchá pomocí stlačeného vzduchu, který je do lázně přiváděn přes rozvod a sítě trubek s malými otvory, které se nachází na dně nádrže. Nevýhodou tohoto systému míchání je možnost ucpání malých otvorů částicemi korundu a neschopnost opětovného rozmíchání částic po delší odstávce. Další poměrně významnou nevýhodou dosavadního míchání je nákladnost výroby poháněcího média, tedy stlačeného vzduchu. Kompresory obecně mají malou účinnost a poměrně drahou údržbu a servis.

Proto se hledaly jiné možnosti míchání galvanických lázní pro kompozitní povlaky. Experiment je zaměřen na míchání pomocí ejektorů, které se pro tuto aplikaci zdá být vhodné. Tento typ míchání má řadu výhod oproti předešlému typu míchání.

V první části experimentu bylo sestrojeno experimentální zařízení pro zjištění, jakým způsobem se disperzní částice pohybují při míchání pomocí ejektorů a zda mají vůbec ejektory schopnost a výkon pro opětovné rozmíchání částic usazených u dna nádrže. Toto zařízení se skládá ze skleněného akvária, které je umístěno na vozíku pro lepší manipulaci s celým zařízením. Dále byly použity ejektory a bezucpávkové odstředivé čerpadlo s magnetickou spojkou. Čerpadlo s ejektory je propojeno plastovými trubkami a je zde umístěna řada kohoutů pro úpravu průtoků do jednotlivých ejektorů a průtokoměr, díky kterému můžeme posuzovat, jak se chová lázeň v závislosti na průtoku kapaliny ejektory.

Díky skleněným stěnám akvária je poměrně dobře vidět, zda se během míchání korund v některých rizikových místech, jako jsou rohy a místa za ejektory, usazuje či nikoli. Po vypnutí a po usazení částic je vidět rovnoměrnost rozložení usazení částic. Po opětovném spuštění míchání byla zkoumána schopnost ejektorových trysek opětovně rozmíchat kapalinu v akváriu. Jako médium, které se míchá ve vývojovém akváriu, byla použita voda s přidanými částicemi korundu A99 F1500. Množství přidaných částic odpovídá

koncentraci částic přidávaných do provozní vany. Toto médium jsem zvolil kvůli dobré viditelnosti celého procesu.

7.1. Výběr ejektoru

Míchací ejektory jsou hojně používané v mnoha aplikacích a nabízí mnoho výhod oproti jiným způsobům míchání, jako je například míchání pomocí stačeného vzduchu přiváděného trubkami s otvory umístěnými na dně nádrže. Ejektorové trysky jsou k dispozici v mnoha stylech, velikostech a materiálech. Proto je důležité pro zajištění optimálních míchacích výkonů správně chápat rozdíly a principy jednotlivých variant.

Pro správnou volbu musíme nejdříve stanovit potřebný oběh media. Kolikrát za hodinu musí objem nádrže oběhnout pomocí ejektoru, je závislé na aplikaci. Obecně pro pokovovací a oplachovací nádrže se vyžaduje 10 – 20 oběhů za hodinu, ve specifických aplikacích i 30 oběhů za hodinu a více. Dále se vypočítá potřebný průtok, vynásobí se požadovaný počet oběhů nádrže za hodinu s objemem nádrže. Poté se stanoví potřebný vstupní průtok. Průtok za minutu, který je potřebný pro míchání lázně, se podělí pěti, protože ejektorové trysky míchají v poměru 5:1. Dalším krokem je výběr velikosti a počtu ejektoru. Použitím více menších ejektorů zajistíme účinnější promíchávání než s jednou velkou tryskou, a to hlavně u větších obdélníkových nádrží. Nakonec musíme určit umístění jednotlivých trysek. Trysky by měly být umístěny u dna nádrže, protože k nejmenší intenzitě míchání dochází pod nimi.

Pro experimentální akvárium byly dle výše uvedených poznatků a doporučení použity ejektorové trysky ve velikosti 1/4". Při výkonu čerpadla 2 bary je průtok jednou tryskou 23 l.min^{-1} . Podle katalogu výrobce při 2 barech a přívodu 23 l.min^{-1} je cirkulační výkon 107 l.min^{-1} . Použity byly dvě trysky proti sobě. To zajišťuje maximální cirkulační výkon cca 214 l.min^{-1} .



Obr. 31 Experimentální zařízení pro vizualizaci procesu míchání pomocí ejektoru.

7.2. Výběr čerpadla

V provozech povrchových úprav se pro čerpání nebo míchání lázní využívají převážně odstředivá čerpadla v různých provedeních. Používají se v provedení ucpávková nebo bezucpávková s magnetickou spojkou.

Výhodou ucpávkových čerpadel je, že mohou čerpat kapaliny s obsahem pevných částic. Také mohou čerpat kapaliny s obsahem feromagnetických částic a jejich případné opravy nejsou tak cenově náročné. Naopak jejich slabinou jsou úkapy ucpávky, které nejčastěji vznikají v důsledku chodu na sucho, ale dochází k nim i po určité době provozu.

Čerpadla s magnetickou spojkou jsou bezucpávková a při správné volbě použití a provozování, zejména je tím myšleno hlídání chodu na sucho a hlídání vniknutí feromagnetických látek, vykazují tyto čerpadla v provozu výhody. Nevýhodou bezucpávkových čerpadel s magnetickou spojkou je dražší oprava a skutečnost, že není možno čerpat kapaliny s obsahem feromagnetických látek v jakémkoliv množství. Jsou nevhodná pro čerpání pevných látek o obsahu cca 2 % a větších než cca 0,5 mm. Na

životnost dílů čerpadla mají vliv i abrazivní částice, které opotřebovávají jednotlivé dílce čerpadla. Tento jev ale platí pro jakékoliv odstředivé čerpadlo.

Dalším druhem čerpadel, které se v těchto provozech používají, jsou membránová čerpadla s pneupohonem. Tímto typem čerpadel lze čerpat kapaliny s abrazivními částicemi a feromagnetické částice apod. Jejich nevýhodou je cena poháněcího média – stlačeného vzduchu.

Po konzultaci s Ing. Vladimírem Křivánkem z firmy Envicomp, s.r.o., která se zabývá oborem čerpací a filtrační techniky pro průmyslové použití, bylo pro experiment vybráno čerpadlo z řady CM MAG-P. Jedná se o bezucpávková odstředivá čerpadla s magnetickou spojkou. Jsou určena pro čerpání čistých kapalin i chemicky agresivních, bez obsahu pevných nebo feromagnetických látek. Čerpadla jsou vhodná pro kapaliny o hustotě až do $1,9 \text{ kg}\cdot\text{dm}^{-3}$ a viskozitě až do $200 \text{ mm}^2\cdot\text{s}^{-1}$.

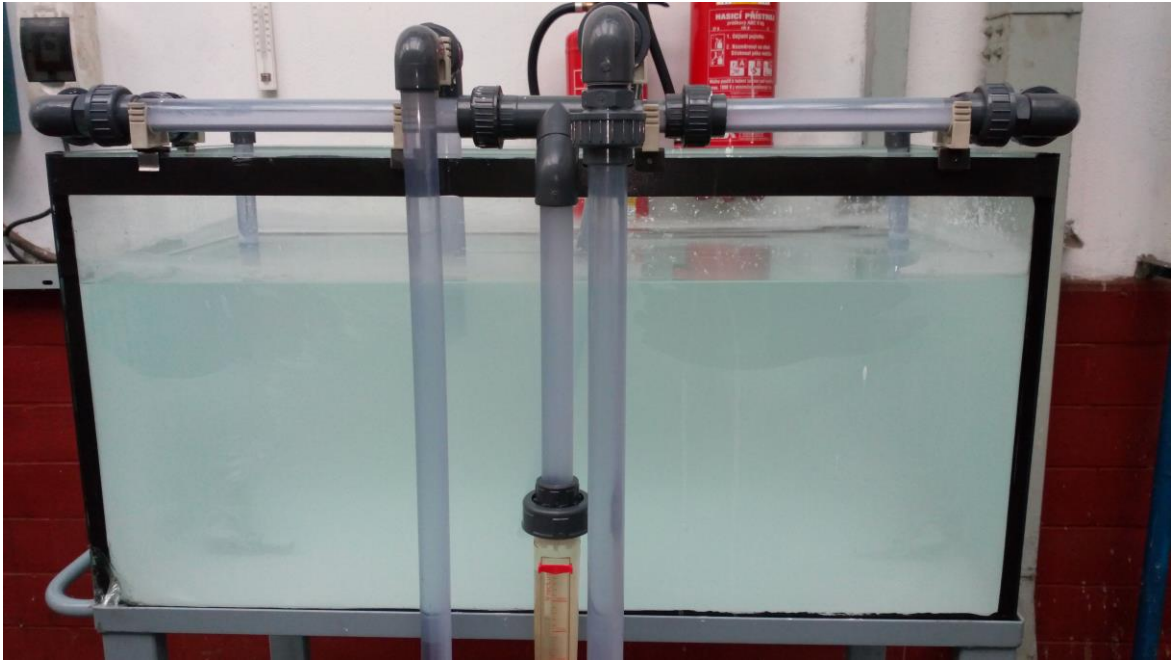
Tato čerpadla se vyrábí ve dvou materiálových provedení, a to PP a PVDF. V materiálovém provedení PP vykazuje čerpadlo teplotní odolnost při trvalém provozu $60 \text{ }^\circ\text{C}$ a při přerušovaném provozu $65 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro naše použití v chromovací lázni je tato teplotní odolnost nahraň. Z tohoto důvodu bylo použito čerpadlo v materiálovém provedení PVDF, které má teplotní odolnost pro trvalý provoz $80 \text{ }^\circ\text{C}$ a pro přerušovaný $90 \text{ }^\circ\text{C}$. Tyto hodnoty teplotní odolnosti jsou pro prováděný experiment dostačující.



Obr. 32 Čerpadlo CM MAG-P15 od firmy M PUMPS. [31]

Tab. 9 Parametry čerpadel od firmy M PUMPS řady CM MAG-P. [31]

Model	CM MAG-P4	CM MAG-P6	CM MAG-P10	CM MAG-P15	CM MAG-P30
Max. výtl. výška	7,3 m	9 m	13 m	20 m	24 m
Max. průtok	3,5 m ³ .h ⁻¹	6,5 m ³ .h ⁻¹	13 m ³ .h ⁻¹	23,5 m ³ .h ⁻¹	35 m ³ .h ⁻¹
Napětí	400 V	400 V	400 V	400 V	400 V
Výkon motoru	0,12 kW	0,25 kW	0,55 kW	1,1 kW	2,2 kW



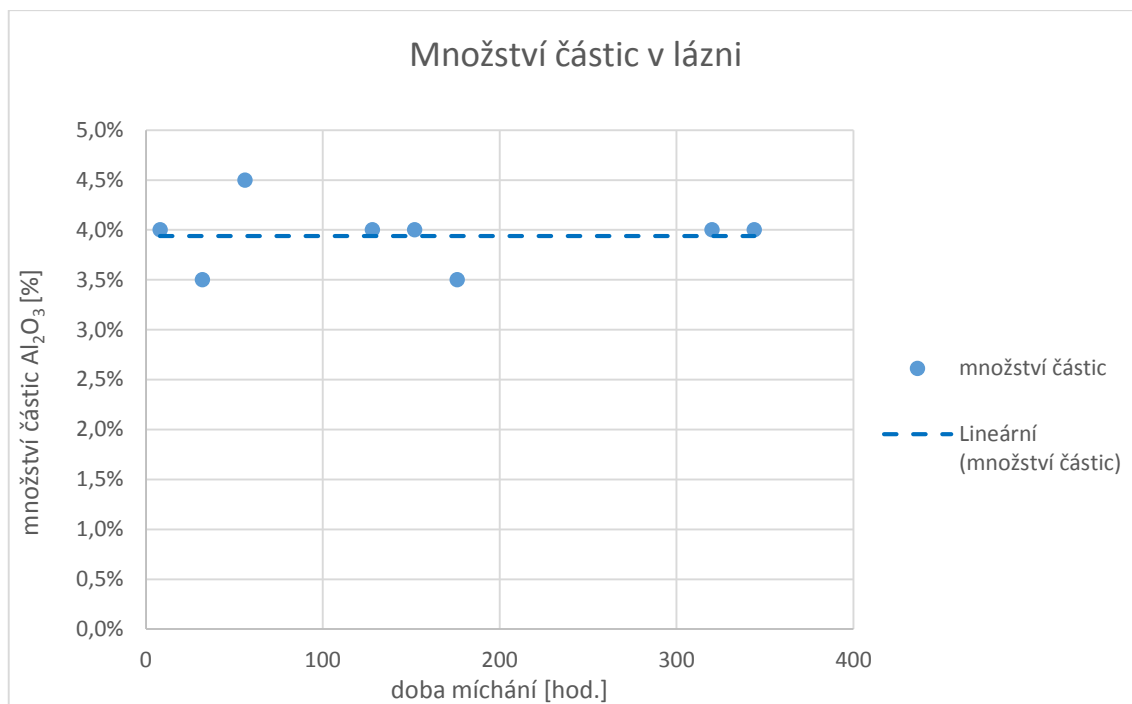
Obr. 33 Experimentální zařízení, medium voda + korund F 1500.



Obr. 34 Odměrný válec pro orientační vizuální zkoušku usazení částic.

Tab. 10 Množství usazení částic v odměrném válci.

Doba míchání [hod.]	Orientační množství usazených částic Al_2O_3 [%]
8	4,0 %
32	3,5 %
56	4,5 %
128	4,0 %
152	4,0 %
176	3,5 %
320	4,0 %
344	4,0 %



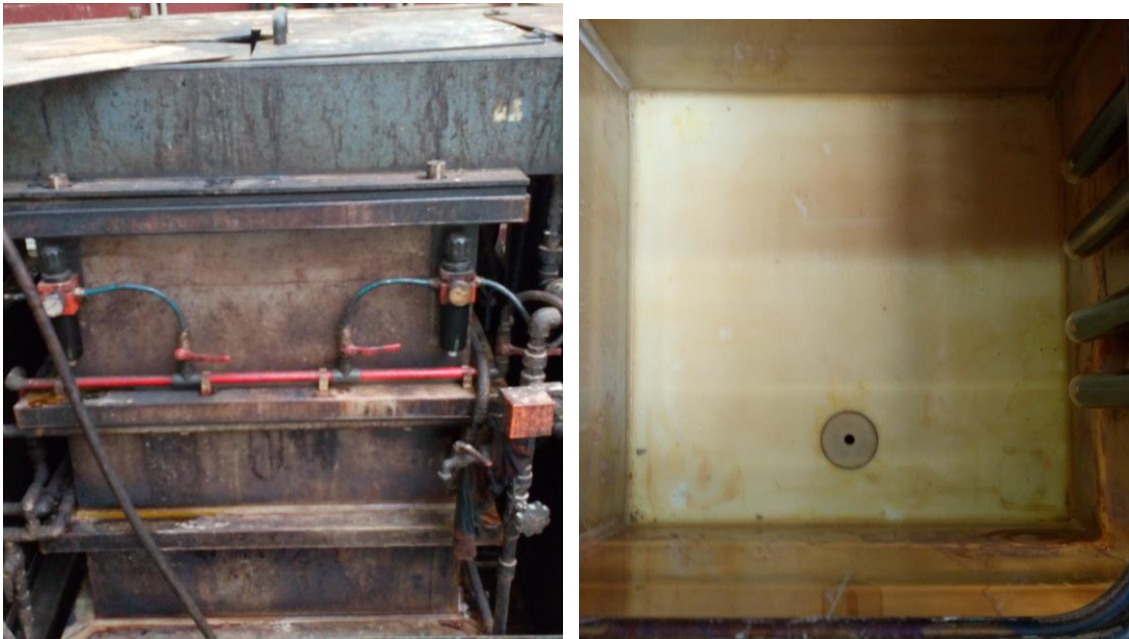
Graf 2 Množství částic Al₂O₃ v lázni v závislosti na době míchání.

7.3. Výsledky experimentu

Výsledkem této části experimentu je, že ejektorové trysky jsou schopny rozmíchat usazené částice a i s poměrně malým průtokem dokáží vytvořit dostatečné proudění, které zaručuje rovnoměrné rozložení částic v lázni během míchání. Zanedbatelné usazeniny se vytvořily pouze v úplných rozích akvária. Po spuštění míchání se lázeň v akváriu míchala celý den, a poté byly odebrány vzorky do odměrných válců. Druhý den po usazení se zkoumalo, jaké množství korundu se v odměrném válci nachází v poměru s odebraným množstvím kapaliny. Tím byla vizuálně zkontrolována náchylnost k usazování částic. Kdyby se množství částic v odebíraném množství kapaliny zmenšovalo, indikovalo by to nadměrné usazování v rozích, hranách a místech za tryskami. Po odebrání určitého počtu těchto vzorků je prokazatelně vidět, že se při míchání nikde částice nadměrně neusazovaly.

8. Návrh zařízení pro míchání ve vývojové vaně

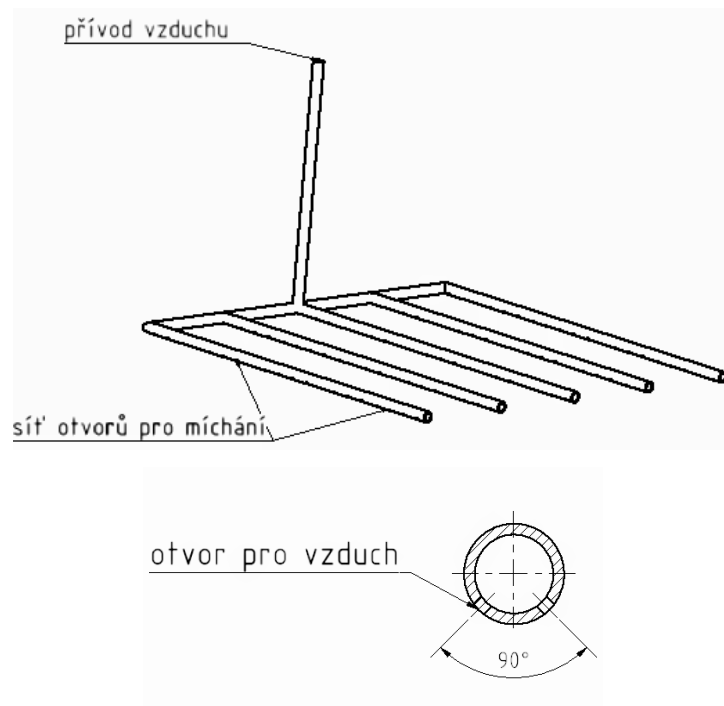
Na obr. 35 vlevo je vidět vývojová vana ve firmě Buzuluk, a.s., vpravo je obrázek odstrojené vývojové vany připravené na instalaci nového systému míchání. Rozměry dna nádrže jsou 800 x 800 mm.



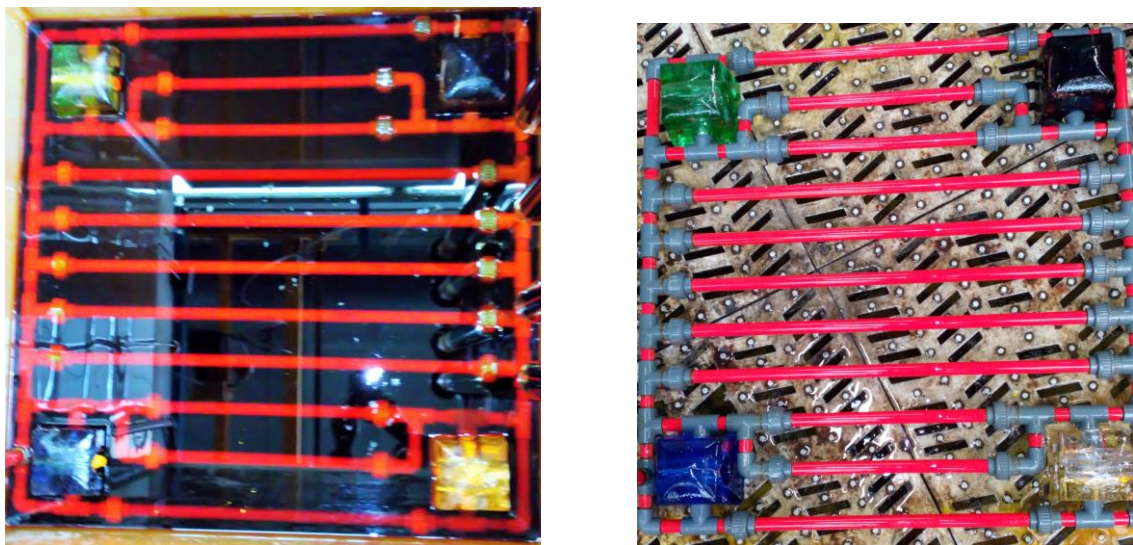
Obr. 35 Vývojová vana ve firmě Buzuluk.

Po konzultaci s Ing. Kavandou z firmy Aquacomp Hard, s.r.o., která se zabývá výrobou zařízení pro galvanické provozy, se jeví jako nejlepší varianta náhrady dosavadního systému míchání pomocí vzduchu varianta míchání pomocí ejektorů.

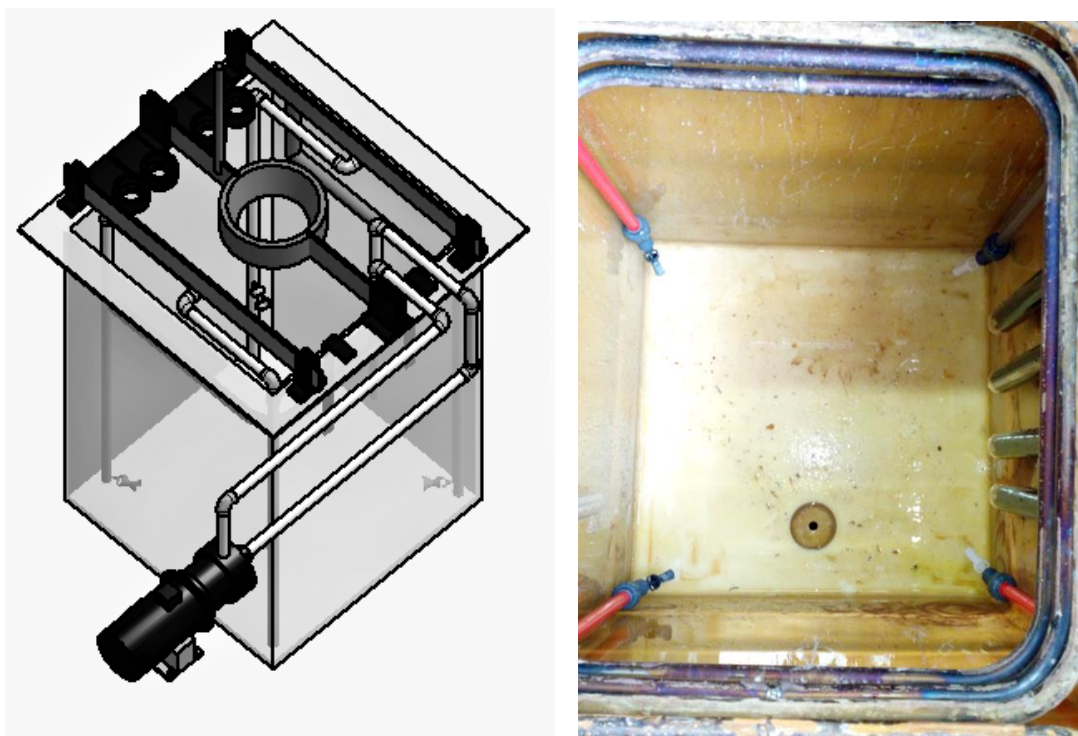
Použitím této metody mohou nastat některé problémy, jako je neschopnost opětovného vzhonu usazených částic pouze pomocí proudu vycházejícího z ejektoru. Proto byl proveden prvotní experiment, který ukázal, že se disperzní částice dokáží rozmíchat i po usazení na dno nádrže. Další otázkou je životnost jednotlivých komponent, jako jsou ejektorové trysky a komponenty čerpadla. Tyto komponenty by měly vydržet prostředí chromovací lázně, která má přibližně 55 °C a je poměrně agresivní. A navíc se zde nacházejí disperzní částice korundu A96 F1500, které by jednotlivé komponenty mohly opotřebit.



Obr. 36 Schéma míchání vzduchem, vlevo rozvod, vpravo umístění otvorů.



Obr. 37 Dosavadní systém míchání chromovací lázně ve vývojové nádrži ve firmě Buzuluk.



Obr. 38 Návrh systému míchání pomocí ejektorů ve vývojové vaně vlevo, vpravo umístění trysek ve vývojové vaně.

V následujícím experimentu bylo sledováno, jaký vliv bude mít rychlost a intenzita míchání lázně na množství vyloučeného korundu v chromovém povlaku a na tloušťku vyloučeného povlaku.

9. Měřicí zařízení

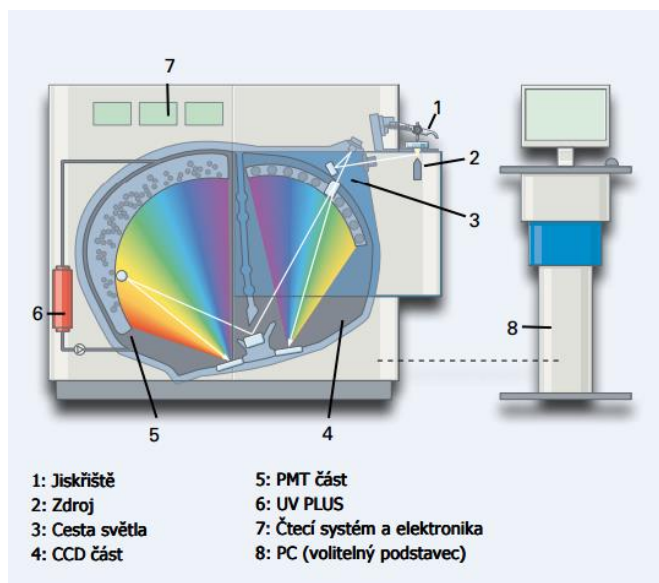
9.1. Měření obsahu vyloučených částic

Měření množství vyloučeného korundu v chromovém povlaku proběhlo na spektrometru SpectroLAB.



Obr. 39 Přístroj SPECTROLAB od firmy Spectro. [26]

Optický systém SPECTROLABu využívá specifické výhody obou typů detektorů, fotonásobiče a CCD senzory. Aby byl systém zcela nezávislý na vlivu okolního prostředí, je vnitřní teplota a tlak držen konstantní. Hermeticky uzavřená vnitřní optická komora je naplněna argonem, který zajišťuje transparentní prostředí pro nejmenší vlnové délky v UV oblasti bez nutnosti použití komplikované technologie. Argon uvnitř optického systému pomocí čerpadla cirkuluje v uzavřeném okruhu přes čisticí patronu, která atmosféru zbavuje nečistot ve formě vzduchu a vodních par. [26]



Obr. 40 Schéma principu optického emisního spektrometru. [26]

Optická emisní spektrometrie (OES) využívající obloukové a jiskrové buzení je preferovaná metoda ke stanovení chemického složení kovových materiálů. Tato metoda je široce používána v průmyslu a zpracování kovových materiálů, včetně primárních výrobců, sléváren a dalších výrobců. [26]

Princip je takový, že prvky obsažené ve vzorku se ve vhodném budícím (excitačním) zdroji atomizují (případně zčásti ionizují) a atomy nebo ionty přecházejí do vyššího energetického stavu. Při návratu na nižší energetickou hladinu částice emitují charakteristické čárové spektrum. Vlnová délka spektrální čáry dává identitu prvku, zatímco intenzita vyzařovaného světla je přímo úměrná počtu atomů daného prvku. [25]

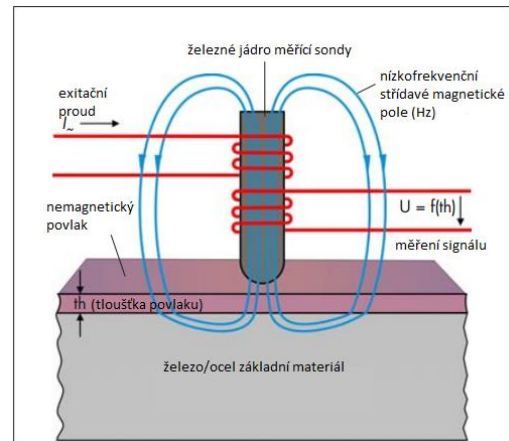
9.2. Měření tloušťky povlaku

Tloušťku povlaku lze zjistit destruktivní nebo nedestruktivní metodou. Mezi destruktivní metody patří například měření vrstvy pomocí optického mikroskopu na příčném výbrusu. Tato metoda je velmi spolehlivá a při aplikaci na kompozitní chromové povlaky umožňuje měřit i jednotlivé vrstvy navrstvené pomocí cyklování. Nevýhodou této metody je časová náročnost příprav vzorků a fakt, že se jedná o destruktivní zkoušku. Díky časové náročnosti se tato metoda nehodí pro sériovou výrobu pístních kroužků, kde je potřeba provádět měření tloušťky na několika vzorcích.

Jako nedestruktivní metoda měření tloušťky povlaku se používá měřidlo se sondou na principu magnetické indukce. Jedná se o nedestruktivní zkušební metodu pro určení tloušťky povlaku. Jedná se o kontaktní zkušební metodu. Nízkofrekvenční střídavý budicí proud vytváří nízkofrekvenční magnetické pole. Hustota magnetického toku závisí na vzdálenosti mezi měřicí sondou a feromagnetickým substrátem. [24]



Obr. 41 FISHERSCOPE MMS PC – měření tloušťky Cr povlaku na pístních kroužcích ve firmě Buzuluk.



Obr. 42 Schéma magnetické indukční zkušební metody.

9.3. Zkušební vzorky

Jako vzorky byly použity kroužky $\varnothing 92,5 \times 2$ z materiálu B-6. Chromování vzorků proběhlo ve vývojové vaně ve firmě Buzuluk. Tato vana má objem elektrolytu 640 litrů. Pro určování množství vyloučeného Al_2O_3 v povlaku na spektrometru je zapotřebí nachromovat vzorky s plochou alespoň 10×10 mm. Proto byly na prostředek trnu umístěny tzv. „matice“. Tyto matice jsou ze stejného materiálu a stejného průměru, jako pístní kroužky, jen mají axiální výšku 15 mm a jsou po obvodě na 4 místech zbroušené, tak, aby vznikly dostatečně velké plochy pro analýzu pomocí spektrometru.

Tab. 11 Chemické složení materiálu B-6. [8]

Chemické složení materiál B-6 v %			
C	3,2 – 4,0	S	≤ 0,05
Si	2,0 – 3,5	Cr	≤ 0,2
Mn	0,3 – 0,6	Ni + Cu	≤ 2,0
P	≤ 0,3		

Tab. 12 Parametry materiálu B-6 použitého na vzorky. [8]

Parametry základního materiálu pro výrobu vzorků	
Materiálová specifikace	KOMA 42 0066, třída 50
Druh materiálu	Tvárná litina – zušlechtěná
Účel použití	Pístní kroužky s maximální pevností
Struktura materiálu	Grafit – zrnitý s min. množstvím červíkovitého grafitu
Tvrdość	106 – 112 HRB, 280 – 360 HB (28 – 38 HRC)
Pevnosť v ohybu	≥ 1 300 N.mm ⁻²
Modul pružnosti	≥ 150 000 N.mm ⁻²
Specifická hmotnosť	7,3 g.cm ⁻³



Obr. 43 Zkušební vzorky, vlevo rozřezaná matice, vpravo pístní kroužky.

Tab. 13 Parametry procesu výroby zkušebních vzorků.

Parametry při přípravě vzorků					
Parametry		vzorek	Míchání - průtok	vzorek	Míchání - průtok
Teplota	55 °C	1	2 000 l.h ⁻¹	5	7 500 l.h ⁻¹
Proudová hustota	50 A.dm ⁻²	2	3 000 l.h ⁻¹	6	10 000 l.h ⁻¹
Povrch	6,7 dm ²	3	4 000 l.h ⁻¹	7	12 000 l.h ⁻¹
Proud	330 A	4	5 000 l.h ⁻¹		

10. Naměřené hodnoty

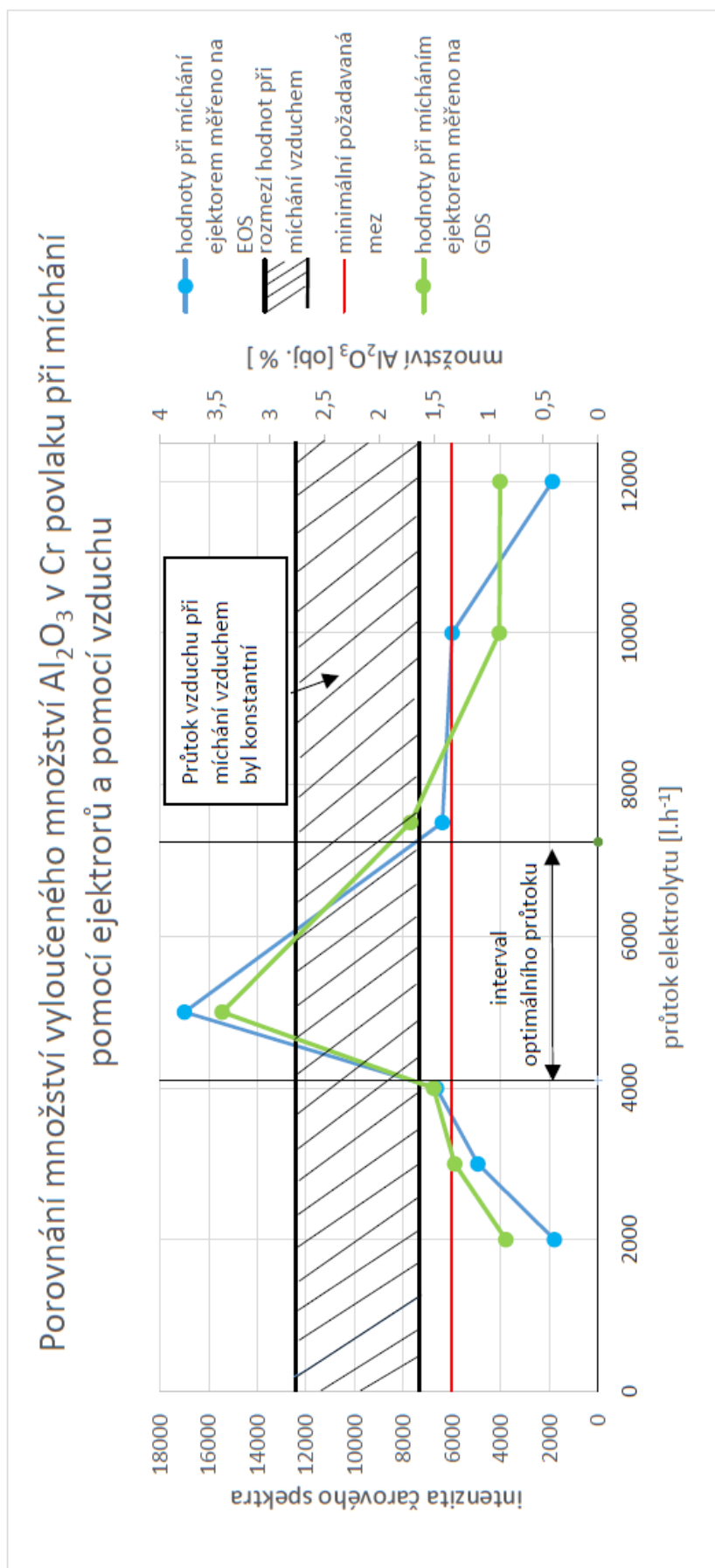
10.1. Obsah částic v povlaku

Bylo provedeno měření na optickém emisním spektrometru SPECTROLAB. Z tohoto měření byly hodnoceny hodnoty, které ukazují intenzitu spektrální čáry vlnové délky pro obsah hliníku ve vzorku. Měření se provádí na čtyřech místech po obvodu zkušebního vzorku. Jako směrodatná hodnota se používá průměr z těchto hodnot. Tato hodnota intenzity spektrální čáry by měla být minimálně 6 000. Čím je vyšší hodnota intenzity, tím větší je obsah prvku ve vzorku.

Tab. 14 Hodnoty naměřené na spektrometru u jednotlivých vzorků

	vzorek 1	vzorek 2	vzorek 3	vzorek 4	vzorek 5	vzorek 6	vzorek 7
Průtok [$l \cdot h^{-1}$]	2 000	3 000	4 000	5 000	7 500	10 000	12 000
Číslo měření	cnt	cnt	cnt	cnt	cnt	cnt	cnt
1	1 560	6 524	4 859	18 219	7 404	4 836	1 737
2	1 418	3 638	4 088	12 081	4 844	4 936	1 891
3	1 120	4 317	6 684	14 751	5 692	7 062	1 542
4	3 076	5 314	10 915	22 924	7 659	7 143	2 321
Průměrná hodnota	1 793,5	4 948,3	6 636,5	16 993,8	6 399,8	5 994,3	1 872,8

Z naměřených hodnot je patrné, že množství vyloučených mikročástic korundu v chromovém povlaku je dostačující u vzorku číslo 3,4 a 5. Největší průměrná hodnota intenzity vlnové délky u vzorku 4 (průtok $5\,000\ l \cdot h^{-1}$) je 16 994 counts a zaručuje dostatečné množství částic Al_2O_3 v chromovém povlaku.



Graf 3 Vliv intenzity míchání elektrolytu na množství vyloučených částic v povlaku a porovnání míchání pomocí ejektorů a pomocí stlačeného vzduchu.

Rozptyl naměřených hodnot u vzorku 4, kdy ani jedna ze změřených hodnot není pod minimální hranicí, vypovídá o přítomnosti dostatečného množství částic plniva po celém obvodu kroužku. Hodnoty u vzorku 3 a 5 se nacházejí také nad minimální mezí. Optimální rozmezí průtoku elektrolytu je v rozmezí 4 500 až 7 000 l.h⁻¹, kdy jsou hodnoty minimálně srovnatelné s dosavadním systémem míchání vzduchem, nebo jej převyšují.

10.2. Tloušťka povlaku

V této části experimentu byl zkoumán vliv intenzity míchání na tloušťku vyloučeného kompozitního chromového povlaku. Měření proběhlo na přístroji FISHERSCOPE MMS PC, který pracuje na principu magnetické indukce. Měření proběhlo u každé hodnoty intenzity míchání lázně na třech kroužcích. Každý kroužek byl změřen na třech místech po obvodu a hodnoty byly zprůměrovány.

Tab. 15 Naměřené hodnoty tloušťky povlaku u vzorku 1 pomocí FISHERSCOPE MMS PC.

Vzorek 1	tloušťka povlaku [μm]			průměr [μm]
č. měření	Kroužek 1	Kroužek 2	Kroužek 3	
1	133	129	86,5	
2	142	75	158	
3	135	157	117	
průměr [μm]	136,67	120,33	120,50	125,83

Tab. 16 Naměřené hodnoty tloušťky povlaku u vzorku 2 pomocí FISHERSCOPE MMS PC.

Vzorek 2	tloušťka povlaku [μm]			průměr [μm]
č. měření	Kroužek 1	Kroužek 2	Kroužek 3	
1	144	124	141	
2	164	118	151	
3	105	135	135	
průměr [μm]	137,67	125,67	142,33	135,22

Tab. 17 Naměřené hodnoty tloušťky povlaku u vzorku 3 pomocí FISHERSCOPE MMS PC.

Vzorek 3	tloušťka povlaku [μm]			průměr [μm]
č. měření	Kroužek 1	Kroužek 2	Kroužek 3	
1	133	133	164	
2	153	159	181	
3	161	123	122	
průměr [μm]	149,00	138,33	155,67	147,67

Tab. 18 Naměřené hodnoty tloušťky povlaku u vzorku 4 pomocí FISHERSCOPE MMS PC.

Vzorek 4	tloušťka povlaku [μm]			průměr [μm]
č. měření	Kroužek 1	Kroužek 2	Kroužek 3	
1	138	140	171	
2	164	149	170	
3	152	132	132	
průměr [μm]	151,33	140,33	157,67	149,78

Tab. 19 Naměřené hodnoty tloušťky povlaku u vzorku 5 pomocí FISHERSCOPE MMS PC.

Vzorek 5	tloušťka povlaku [μm]			průměr [μm]
č. měření	Kroužek 1	Kroužek 2	Kroužek 3	
1	158	120	184	
2	132	142	125	
3	176	168	138	
průměr [μm]	155,33	143,33	149,00	149,22

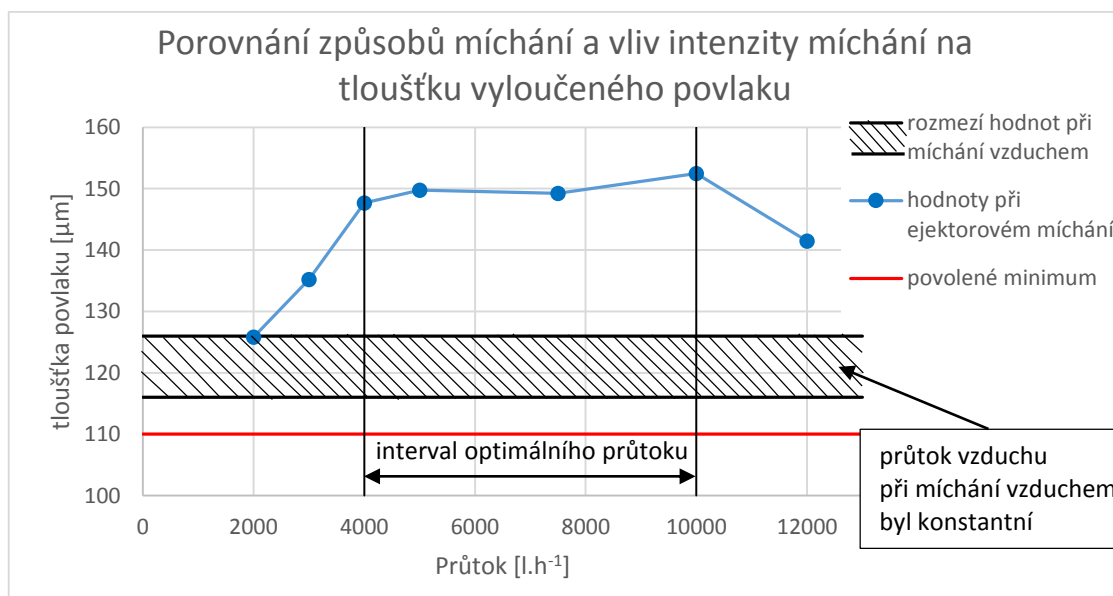
Tab. 20 Naměřené hodnoty tloušťky povlaku u vzorku 6 pomocí FISHERSCOPE MMS PC.

Vzorek 6	tloušťka povlaku [μm]			průměr [μm]
č. měření	Kroužek 1	Kroužek 2	Kroužek 3	
1	172	149	150	
2	143	136	138	
3	169	155	160	
průměr [μm]	161,33	146,67	149,33	152,44

Tab. 21 Naměřené hodnoty tloušťky povlaku u vzorku 7 pomocí FISHERSCOPE MMS PC.

Vzorek 7	tloušťka povlaku [μm]			průměr [μm]
č. měření	Kroužek 1	Kroužek 2	Kroužek 3	
1	156	155	145	
2	161	141	126	
3	106	157	126	
průměr [μm]	141,00	151,00	132,33	141,44

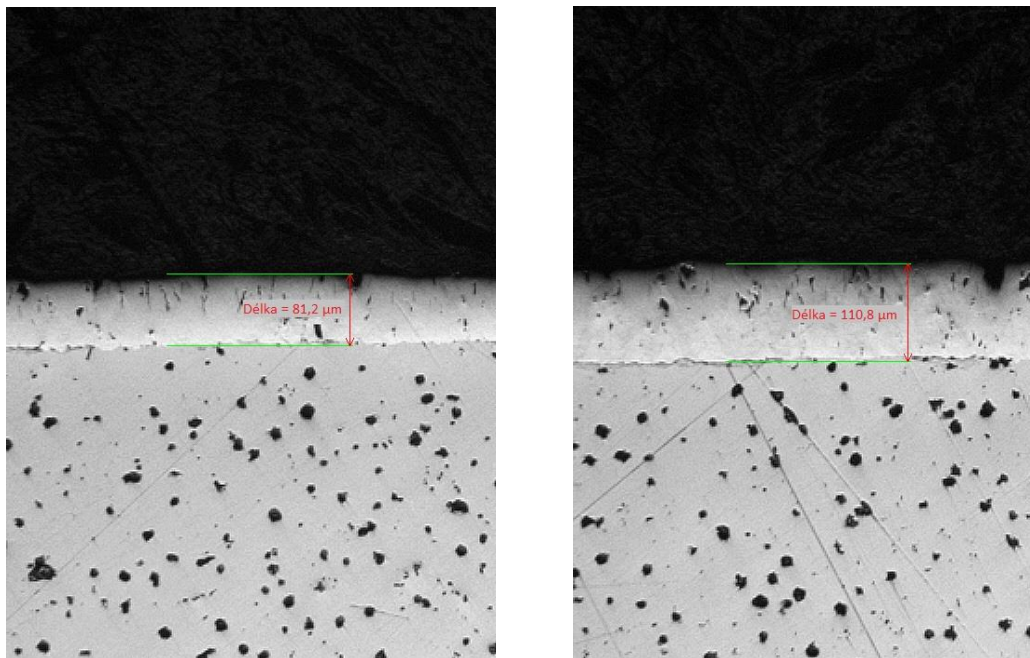
Naměřené hodnoty byly vyneseny do grafu v závislosti na intenzitě míchání kompozitní chromové lázně. Z výsledné křivky je patrné, že tloušťka povlaku závisí na intenzitě míchání. Při malé intenzitě míchání se na povrchu kroužků vyloučila menší tloušťka povlaku než při větší intenzitě. Optimální intenzita míchání z hlediska tloušťky vyloučeného povlaku je rozmezí 5 000 až 10 000 l.h^{-1} . Při větším průtoku, jaký byl nastaven pro vzorek 7 (12 000 l.h^{-1}), vyloučená tloušťka povlaku klesá.



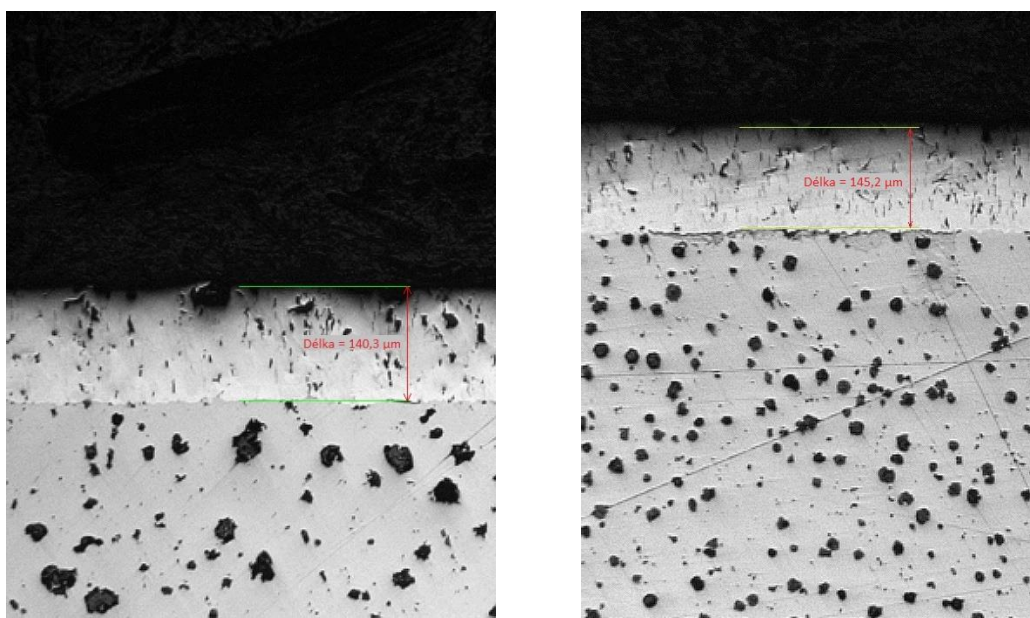
Graf 4 Porovnání tlouštěk vyloučeného povlaku při míchání kompozitní chromové lázně pomocí ejektorových trysek a pomocí vzduchu.

V grafu (6) byla porovnána tloušťka povlaku vyloučeného při míchání vzduchem a při míchání pomocí ejektorů. Při míchání lázně pomocí ejektorů bylo dosaženo větší tloušťky povlaku než při míchání lázně pomocí stlačeného vzduchu. Díky tomu je možné zkrátit dobu chromování a tím docílit ekonomické úspory.

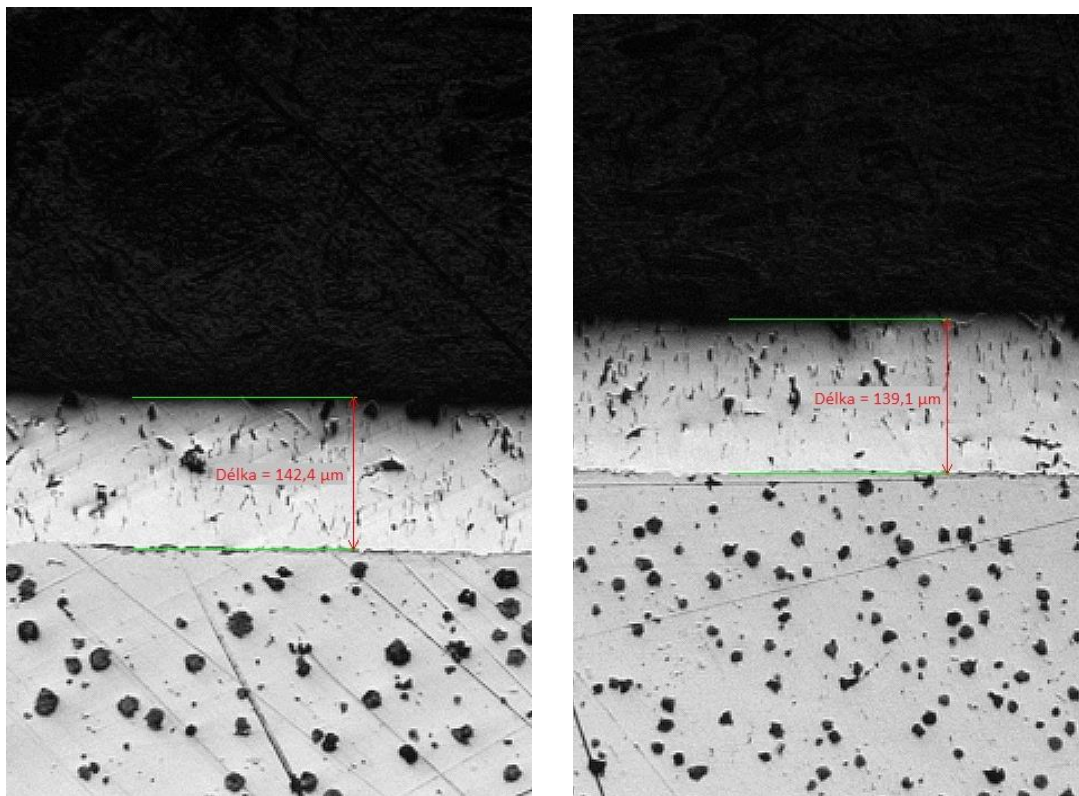
Tloušťka povlaku u jednotlivých vzorků byla měřena i na optickém mikroskopu na příčném výbrusu.



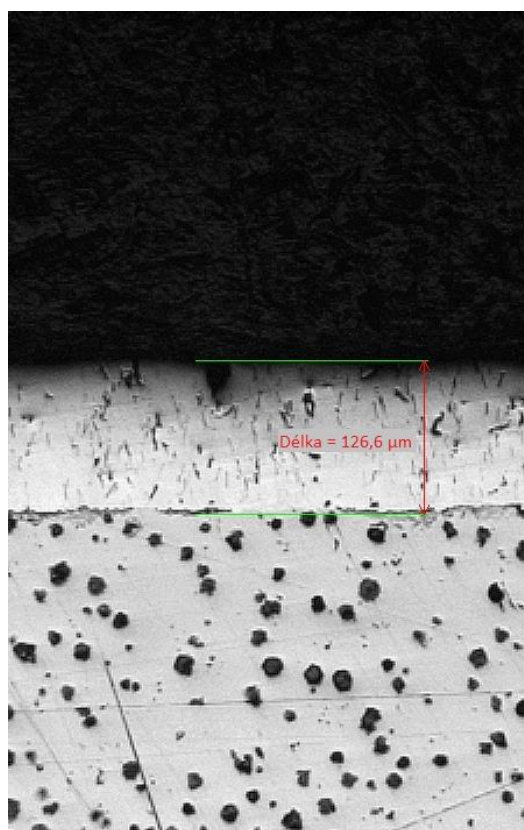
Obr. 44 Příčný výbrus vzorku 1 (vlevo) a vzorku 2 (vpravo).



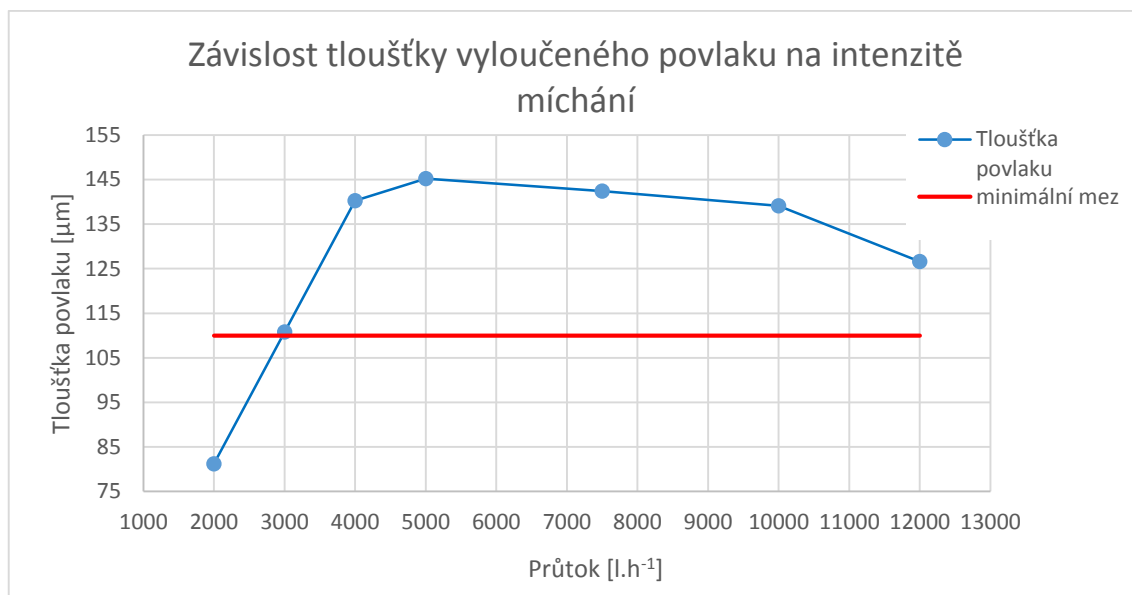
Obr. 45 Příčný výbrus vzorku 3 (vlevo) a vzorku 4 (vpravo).



Obr. 46 Příčný výbrus vzorku 5 (vlevo) a vzorku 6 (vpravo).



Obr. 47 Příčný výbrus vzorku 7.



Graf 5 Závislost tloušťky vyloučeného povlaku na intenzitě míchání, měřeno na příčném výbrusu.

Výsledky tloušťky povlaku změřené pomocí optického mikroskopu na příčných výbrusech odpovídají tloušťkám změřeným na tloušťkoměru *FISHERSCOPE MMS PC*. Hodnoty u vzorků s průtokem 2 000 l.h⁻¹ a 3 000 l.h⁻¹ jsou nižší než naměřené hodnoty pomocí tloušťkoměru, to je způsobeno nerovnoměrně vyloučeným povlakem po obvodu pístního kroužku u těchto vzorků.

11. Ekonomické zhodnocení

Aplikací navrhovaného řešení míchání kompozitní chromové lázně by došlo ke značné úspoře výrobních nákladů. Dosavadní systém míchání je poháněn pomocí centrálního kompresoru, který zásobuje celou firmu. Jedná se o šroubový kompresor KAESER DSD 281 o výkonu motoru 160 kW, tlaku 10 barů a výkonu 23,5 m³.min⁻¹. V dokumentech firmy Buzuluk je uvedena cena za 1 m³ stlačeného vzduchu z tohoto kompresoru ve výši 0,4 – 0,5 Kč. Přitom jedna provozní vana spotřebuje cca 18 m³ za hodinu. Při nepřetržitém provozu míchacího zařízení jsou roční provozní náklady 72 360 Kč. Jako jedno z řešení k docílení úspory je použití menšího kompresoru o výkonu dostačujícím na jednu vanu. Pro tuto aplikaci je dostačující kompresor od firmy FIAC CCS 50/335, o pracovním tlaku 10 bar, příkonu motoru 3 kW a výkonu 18 m³.h⁻¹, který má firma Buzuluk k dispozici. Pokud by se použil tento kompresor, který by poháněl jen jednu vanu, byly by roční

provozní náklady 55 476 Kč. Přitom použitím systému s ejektorovými tryskami by roční provozní náklady činily pouze 26 054 Kč.

Tab. 22 Náklady na provoz centrálního kompresoru.

Centrální kompresor		
Cena vzduchu	0,5	Kč.m ⁻³
Potřebné množství vzduchu	18,0	m ³ .h ⁻¹
Hodinové provozní náklady	9,0	Kč.h ⁻¹
Doba provozu za den	24	h
Počet provozních dnů za týden	7	dnů
Počet provozních dnů za rok	335	dnů
Provozní náklady na den	216,0	Kč
Provozní náklady na týden	1 512,0	Kč
Provozní náklady na 1 rok	72 360,0	Kč

Tab. 23 Náklady na provoz malého kompresoru.

Malý kompresor		
Cena elektřiny	2,3	Kč.kWh ⁻¹
Příkon	3	kW
Cena vzduchu	0,383	Kč.m ⁻³
Potřebné množství vzduchu	18	m ³ .h ⁻¹
Hodinové provozní náklady	6,9	Kč.h ⁻¹
Doba provozu za den	24	h
Počet provozních dnů za týden	7	dnů
Počet provozních dnů za rok	335	dnů
Provozní náklady na den	165,6	Kč
Provozní náklady na týden	1 159,2	Kč
Provozní náklady na 1 rok	55 476,0	Kč

Tab. 24 Náklady na provoz čerpadla.

Čerpadlo		
Cena elektřiny	2,3	Kč/kWh
Příkon	2	kW
Hodinové provozní náklady	4,6	Kč/h
Doba provozu za den	24	h
Počet provozních dnů za týden	5	dnů
Počet provozních dnů za rok	236	dnů
Provozní náklady na den	110,4	Kč
Provozní náklady na týden	552,0	Kč
Provozní náklady na 1 rok	26 054,4	Kč

Tab. 25 Porovnání ročních provozních nákladů jednotlivých variant.

Roční provozní náklady		
Centrální kompresor	72 360,0	Kč
Malý kompresor	55 476,0	Kč
Čerpadlo	26 054,4	Kč

Aplikací navrhnutého řešení by vznikla úspora provozních nákladů ve výši 46 306 Kč za rok na jednu provozní vanu obsahující částice korundu. Tyto vany jsou momentálně v provozu čtyři, tedy celková provozní úspora by byla 185 222 Kč. Investice do jednoho zařízení pro ejektorové míchání je 30 000 Kč, celková investice do zařízení pro čtyři vany je 120 000 Kč. Navíc při dosavadním míchání dochází při čištění vany k destrukci systému trubek umístěných na dně vany. Tyto náklady u navrhovaného řešení odpadají. Do propočtu jsem nezahrnoval náklady na údržbu zařízení.

12. Závěr

V rámci této diplomové práce byla řešena problematika kompozitních chromových povlaků pro použití na pístní kroužky. Hlavním cílem bylo vyvinout a aplikovat nový systém míchání kompozitní galvanické lázně. Nejprve byla rozebrána teorie zabývající se pístními kroužky, opotřebením a povrchovými úpravami používanými na pístní kroužky, zejména problematikou chromování a kompozitními tvrdochromovými povlaky.

V práci bylo dále navrženo experimentální zařízení pro míchání lázně obsahující disperzní částice korundu Al_2O_3 . V prvotním experimentu bylo zkoumáno usazování částic Al_2O_3 a schopnost navrženého zařízení opětovného rozmíchání těchto usazených částic. Z výsledků uvedených v tabulce (9) je patrné, že se částice Al_2O_3 během míchání neusazují a po odstavení a opětovném zapnutí míchání dochází ke vznosu částic ode dna.

Po prvotním experimentu, který ukázal vhodnost navrženého zařízení pro míchání galvanické lázně s obsahem disperzních částic Al_2O_3 , bylo zařízení aplikováno na vývojovou vanu ve firmě Buzuluk, a.s. Poté byly připraveny vzorky s chromovým kompozitním povlakem. Pro tyto vzorky byl použit výše zmíněný postup chromování se změnou polarity a jako plnivo byl použit materiál Al_2O_3 . Jednotlivé vzorky byly připravovány s různou intenzitou míchání lázně. Pro porovnání byly připraveny vzorky se stejným povlakem, který byl vytvořen v lázni míchané dosavadním způsobem. Byl sledován vliv intenzity míchání na tloušťku vyloučeného povlaku a na množství částic Al_2O_3 v povlaku.

Z naměřených hodnot je patrné, že intenzita míchání má značný vliv na tloušťku vyloučeného povlaku. Pro tloušťku povlaku není vhodná malá ani příliš velká intenzita míchání. Největší tloušťka povlaku se vyloučila při průtoku $10\ 000\ l\cdot h^{-1}$. V porovnání s povlaky vyloučenými při míchání pomocí vzduchu je zřejmé že pomocí nového typu míchání je docíleno vyšších hodnot tloušťky povlaku, tudíž pro docílení požadované tloušťky povlaku můžeme snížit dobu chromování a tím zvýšit produktivitu procesu.

Z hodnot množství disperzních částic Al_2O_3 vyloučených v chromovém povlaku je patrné, že intenzita míchání výrazně toto množství ovlivňuje. V grafu je znázorněná minimální mez, přes kterou se dostaly pouze vzorky 3, 4 a 5. Největší množství vyloučených částic v chromovém povlaku se podle měření nachází u vzorku číslo 4, který

se chromoval při průtoku $5\,000\text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$. Hodnoty naměřené při malé intenzitě míchání lze přičítat nedostatečnému promíchávání lázně a usazováním částic na dně. Naopak malé množství vyloučeného Al_2O_3 v povlaku při vysoké intenzitě míchání je pravděpodobně způsobeno moc rychlým pohybem částic v elektrolytu, a proto tyto částice nestačí ulpět na povrchu pokovované součásti. Z průniku obou ideálních rozmezí průtoku vyplývá, že ideální průtok je v intervalu $4\,500\text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$ až $7\,000\text{ l}\cdot\text{h}^{-1}$.

Navržené řešení nejen, že je schopno plnohodnotně nahradit dosavadní technologii míchání, ale při použití nového systému míchání dochází k vyloučení větší tloušťky povlaku. Díky tomu lze zkrátit dobu chromování a tím docílit vyšší produktivity. Z ekonomického hlediska je investice do nové technologie míchání kompozitních galvanických lázní opodstatněná, protože roční úspora provozních nákladů je 185 222 Kč a investice do zařízení je 120 000 Kč.

13. Použitá literatura

- [1] HRABÁK, Václav. BUZULUK KOMÁROV A.S. *Pístní kroužky: Konstrukce, výroba, provoz*. Hořovice: Reprografické studio CHARLIE, 2000.
- [2] *Piston rings handbook* [online]. 2008 [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: <http://korihandbook.federalmogul.com/en/toc.htm>
- [3] Pístní kroužky, kluzná ložiska, pomůcky pro usazení kroužků a vložek válců [Náhradní díly]. [online]. 2015 [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: <http://www.ihr-autodily.cz/cs/nahradni-dily/141-pistni-krouzky/>
- [4] *Geotze praktický průvodce: Pístní kroužky* [online]. [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: http://www.cesomot.cz/doc_cz/GOETZE-pistni-krouzky.pdf
- [5] PLUHAŘ, Jaroslav. *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálu*. Praha: SNTL, 1987.
- [6] VOCEL, Milan, Vladimír DUFEK a Kolektiv . *Tření a opotřebení strojních součástí*. Praha: SNTL, 1976.
- [7] JANOVEC, Jiří, Karel MACEK a Petr ZUNA. *Fyzikální metalurgie*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-02935-0.
- [8] KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2000. ISBN 80-7082-668-1.
- [9] PODJUKLOVÁ, Jitka. *Speciální technologie povrchových úprav 1*. Ostrava: VŠB-TU, 1997. ISBN 80-7078-235-8.
- [10] PRANTNEROVÁ, Michaela. *Žárové nástřiky*. VZÚ Plzeň [online]. [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://www.vzuplzen.cz/zarove-nastriky/technologie.php>
- [11] HORA, Otakar. *Povrchové úpravy pístních kroužků*. Brno, 2014. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=84693. Bakalářská.
- [12] GREENWOOD, John David. *Hard chromium plating: A handbook of modern practice*. Teddington: Draper, 1964.

- [13] OBR, Ladislav. Funkční chromování – HEEF 25. *Povrchové úpravy*. 2008, č. 2. Dostupné z: <http://www.povrchoveupravy.cz/2008-02-clanek04.html>
- [14] MOHYLA, Miroslav. *Technologie povrchových úprav kovů*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2000. ISBN 80-7078-953-0.
- [15] *Tvrdé chromování* [online]. 2014 [cit. 2014-05-10]. Dostupné z: <http://www.bomex.cz/cz/3-technologie/8-tvrde-chromovani.html>
- [16] *Tvrdé chromování pro technické účely* [online]. 2014 [cit. 2014-05-11]. Dostupné z: <http://www.ostroj.cz/tvrde-chromovani-pro-technicke-ucely>
- [17] ENŽL, Radek, Šárka HOUDKOVÁ, Jaromíra SUDOVÁ a Olga BLÁHOVÁ. Náhrada tvrdého chromování žárovými nástřiky. 2002. Dostupné z: http://www.metal2014.com/files/proceedings/metal_02/papers/29.pdf
- [18] Chocholatý, O.; Kříž, A. Kompozitní Cr povlaky pro pístní kroužky. *Koroze a ochrana materiálů* 2014, vol. 58, no. 3, p. 84–87.
- [19] MUDROCH, Otakar. Chromování, tvrdé a porozivní povlaky. Praha: SNTL, 1959.
- [20] GABE, D.R. Process agitation : from air bubbling to eductor jetting. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*. 2006, s. 67-78.
- [21] HUW, Williams. PLATING RATE ENHANCEMENT THROUGH THE EXPLOITATION OF AIRLESS, EDUCTOR AGITATION. In: [online]. 2005 [cit. 2015-03-07]. Dostupné z: <http://serfilcocom.blob.core.windows.net/pdfs/lituratione/T-F159.pdf>
- [22] REICHERT, Charles. PRINTED CIRCUIT BOARD: Reducing metal usage and improving PWB quality through the use of SER-DUCTOR" agitation. In: [online]. 2005 [cit. 2015-03-08]. Dostupné z: <http://serfilcocom.blob.core.windows.net/pdfs/lituratione/CH-26.pdf>
- [23] OBR, Ladislav. Defekty v technologiích povrchových úprav. *Progresivní a netradiční technologie povrchových úprav: 11. mezinárodní odborný seminář Sborník přednášek*. 2014, s. 26-31.

- [24] Probes for coating thickness measurements. Helmut-Fischer [online]. 2014 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: http://www.helmut-fischer.com/fileadmin/user_upload/default/Brochures/en-gb/BROC_Probes_902-111_en.pdf
- [25] Atomová spektrometrie. VŠCHT [online]. [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://web.vscht.cz/~koplikr/Atomov%C3%A1%20%20spektrometrie.pdf>
- [26] SPECTROLAB: Výkon a flexibilita ruku v ruce: Nejlepší v analýze kovových materiálů. Spectro [online]. 2011 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.spectro.cz/store/spectrolab11-cze.pdf>
- [27] ABRANOVA. Umělý bílý korund A99 [online]. 2007 [cit. 2015-06-12]. Dostupné z: <http://www.abranova.cz/brusne-materialy/korund/umely-bily-korund-a99.htm#>
- [28] BUZULUK. Firemní podklady firmy Buzuluk, a.s. Komárov, 2011.
- [29] Custom Spray Solution - Florida Sprayers [online]. 2015. 2015 [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://flsprayers.com/products-page/teejet/teejet-eductor-nozzles/>
- [30] Cosmostar: Cosmostar - Fluid Handling Equipment Europe [online]. 2012 [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://cosmo-star.com/2012/07/24/portable-mounting-agitator/>
- [31] M PUMPS [online]. 2013 [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: http://www.mpumps.it/?plg_custom_page=b
- [32] CARBODEON. Carbodeon: METAL FINISHING [online]. 2014 [cit. 2015-06-10]. Dostupné z: <http://www.carbodeon.net/index.php/en/2012-11-29-23-21-41/metal-finishing>

14. Přílohy

Příloha 1: Protokoly z měření na spektrometru SPECTROLAB

Příloha 2: Příčné výbrusy, naleptané

Příloha 3: Podélný výbrus